# Курсовая работа

# Исследование реакции нижней ионосферы на высыпание энергичных частиц из радиационных поясов Земли

В данной курсовой работе сделан обзор теоретических методов исследования высыпания энергичных электронов на средних широтах и реакция нижней ионосферы на такие высыпания в зависимости от параметров частиц.

Рассмотрены некоторые виды взаимодействия ионосферы с магнитосферой, и высыпание частиц как результат такого взаимодействия. Также рассмотрены некоторые виды взаимодействий волна – частица и, как результат, изменение параметров энергичных частиц или же их высыпание. Сделаны оценки параметров частиц (электронов или протонов), высыпающихся на средних широтах.

## Ключевые слова: высыпание, энергичные частицы, электрон, протон, нижний D слой ионосферы, рассеяние энергии, модуляция потоков частиц, кинетический метод, гидродинамический метод.

# Содержание.

Ведение

1. Оценки параметров энергичных электронов и протонов, которые высыпаются на средних широтах (обзор

1.1 Анализ отдельных случаев

1.1.1. Явление, связанное с волнами типа свистов

1.1.2. Явление, связанное с электромагнитной ионно-циклотронной волной

1.1.3. Явление, связанное с электростатической ионно-циклотронной волной

1. Изучение кинетических методов исследования

2.1. Электроны

2.1.1. Потеря энергии и рассеяние

2.1.2. Обратное рассеяние энергичных электронов атмосферой

2.1.3.Поглощение высокоэнергичных электронов в атмосфере2.2. Протоны

1. Изучение гидродинамических методов исследования

3.1. Модуляция потоков энергичных частиц гидромагнитными волнами

3.1.1. Случай быстрой изотропизации3.1.2. Случай сохранения адиабатических инвариантов;………………….22

3.1.3. Модуляция инкремента нарастания свистовой моды

3.1.4. Модуляция потоков высокоэнергичных частиц

3.2. Продольные электрические поля

1. Теоретические оценки эффектов в нижней ионосфере

Заключение

Литература

# Введение.

В настоящее время надежно установлено, что Земля и ее магнитное поле погружены в непрерывно текущий поток плазмы солнечного происхождения – солнечный ветер. Солнечный ветер, который представляет собой расширение солнечной короны со сверхзвуковой скоростью, несет с собой в космическое пространство магнитное поле Солнца. Магнитное поле Земли взаимодействует с плазмой солнечного ветра, и на геоцентрическом расстоянии примерно между Землей и Солнцем образуется ударный фронт. Основной поток солнечного ветра обтекает Землю и уносит геомагнитное поле в длинный магнитный хвост. Следовательно, Земля окружена магнитной полостью – магнитосферой, строение и свойства которой определяются главным образом магнитным полем земли и токами, генерируемыми солнечным ветром. Считают, что частицы солнечного ветра попадают в атмосферу либо через магнитный хвост, либо через полярные каспы с низкой напряженностью магнитного поля, расположенные на дневной стороне Земли. Как известно в магнитосфере протекает множество физических процессов. Многие из них, косвенно связанные с такими давно известными явлениями, как полярные сияния (высыпание частиц в полярных широтах), и магнитные бури, прямо или косвенно обусловлены взаимодействием солнечного ветра и магнитосферы Земли.



Чтобы узнать как взаимодействуют магнитосфера и ионосфера необходимо изучить все, или хотя бы основные, происходящие процессы. Для этого следует вначале предположить (грубое предположение), что ионосфера и магнитосфера существуют независимо друг от друга, и изучить их по отдельности. Затем можно предположить, что некоторые процессы в ионосфере являются следствием некоторых процессов в магнитосфере (или наоборот). Т. е., в принципе следует изучать магнитосферу и ионосферу как две сильно связанные системы.

Было сделано предположение о двух видах взаимодействия: корпускулярном и волновом. Первый процесс происходит «сверху вниз»: т.е. частицы, высыпаясь из радиационных поясов магнитосферы воздействуют на ионосферу. Второй – может осуществляться как «снизу вверх», так и при помощи различных внешних факторов (к примеру – солнечный ветер). Частым результатом такого процесса является высыпание частиц в атмосферу Земли. Высыпания могут быть совершенно различными, как по энергиям, так и по углам вхождения в атмосферу. Высыпания различают также по типу частиц: протоны или электроны.

Отметим, что результаты высыпаний электронов и протонов (степень ионизации и глубина проникновения) с одинаковыми энергиями и углами вхождения будут различными.

В данной работе будет рассмотрено взаимодействие магнитосферы Земли посредством различных типов волн с частицами, находящимися в радиационном поясе в зависимости от параметров взаимодействующих волн и частиц. Также будет рассмотрено высыпание различных частиц. Но здесь будет рассмотрено лишь несколько видов взаимодействий высыпающихся частиц с атмосферой. Так как высыпаются не только электроны, но и протоны, то процессы, происходящие при этом, будут различны. Например, эффективность ионизации зависит не только от энергии частиц, но и от начальных углов, под которыми входят частицы. Существует также высотная зависимость степени ионизации от энергии частиц, причем для различных частиц своя.

# 1. Оценки параметров энергичных электронов и протонов, которые высыпаются на средних широтах.

(В данной главе рассмотрены различные случаи высыпаний высокоэнергичных частиц под воздействием различных типов волн: свистов и ионно-циклотронных)

Во время геомагнитных возмущений высыпание энергичных электронов из радиационных поясов Земли может быть основным источником притока энергии для ионизации среднеширотной мезосферы. Один особенно интенсивный тип высыпаний – это случаи высыпания релятивистских электронов (ВРЭ), которые характеризуются чрезвычайно высокой энергией электронов (>100 кэВ) вблизи верхнего предела, определяемого сильной диффузией по питч-углу. Такие события были сначала отождествлены по поглощению рассеянных вперед радиосигналов, связанных с резко выраженным возрастанием ионизации в области D. Последующие исследования радиоволн позволили установить общую метеорологию таких явлений и четко указали на прямую связь их с активностью суббурь. Однако количественная оценка вводимой при таких событиях энергии электронов и ее воздействие на среднюю атмосферу требует прямых ракетных или спутниковых наблюдений. Были запущены детекторы, способные измерять энергетический спектр и распределение по питч-углам электронов с разрешением, необходимым для точных модельных исследований реакции атмосферы. Представленные здесь результаты дают достаточно детальный обзор случаев интенсивных ВРЭ, полученных прямым исследованием данных со спутника за 14 месяцев.

Важный результат, полученный при анализе данных спутника, состоит в том, что электроны высокой энергии(>100 кэВ) часто оказываются ограниченными зоной с рассеянием в режиме сильной диффузии, которая, как правило, совпадает с районом высыпания ионов в том же режиме. Все (за исключением семи) из 313 случаев, интенсивных ВРЭ обнаруживают такую взаимосвязь. Эта особенность ВРЭ позволяет предположить наличие единого процесса рассеяния, что необходимо учитывать при отборе потенциально возможных механизмов электронного высыпания. Выявлены три достаточно четко различающихся типа высыпаний электронов высокой энергии. Каждый тип может быть связан с данным рассеянием электронов известными магнитосферными плазменными волнами.

При адиабатических условиях энергичные электроны могут совершать колебательное движение между магнитными «зеркальными» точками в неоднородном магнитном поле. Частицы будут зеркально отражаться над атмосферой, и, таким образом, являются захваченными. Частицы, оказавшиеся в конусе потерь, высыпаются в атмосферу и гибнут. Для электронов и ионов высокой энергии во внешнем радиационном поясе наиболее эффективным механизмом рассеяния по питч-углам предполагает существование резонансных взаимодействий с естественными плазменными волнами в магнитосфере, что приводит к доплеровскому смещению частоты на величину, кратную релятивистской гирочастоте.

Резонанс с электронами требует большого доплеровского смещения (или высоких скоростей электронов) и энергии

. (1)



Ионы для резонанса должны иметь энергию:

(2)



На основании теоретических аргументов можно предположить, что ионно-циклотронные волны легче всего генерируются внутри плазмосферы, имеющей высокую плотность плазмы, или в пределах отделившихся от плазмосферы плазменных областей, в которых. Ем=0.3-10 кэВ. Поэтому резонансные энергии электронов должны располагаться в ультрарелятивистской области (0,5 –50 МэВ), в то время как резонансная энергия ионов равна 1 –1000 кэВ.

Ионно-циклотронные волны наблюдались преимущественно в вечернем секторе магнитосферы с типичным значением максимальной амплитуды в несколько гамм. На основании рис. 1 (1) можно заключить, что этого достаточно для вовлечения резонансных ионов и высокоэнергичных электронов в режим сильной диффузии.

# Рис. 1 Минимальные амплитуды флуктуирующих электрического и магнитного полей, необходимые для рассеяния протонов (+) или электронов (-) в режиме сильной диффузии на L=6. При других значениях L необходимые амплитуды изменяются как .



Однако, за исключением случаев, когда плотность плазмы очень велика, резонансные энергии электронов будут лежать заведомо выше 1 МэВ.



Чисто электростатические волны наблюдались во внешней магнитосфере в частотных полосах, центрированных между гармониками электронной гирочастоты. Их часто называют верхними гибридными волнами. Как правило, волны поляризованы, причем волновой вектор k почти перпендикулярен к вектору магнитного поля B , и продольная составляющая волнового вектора k сравнима с величиной обратного ларморовского радиуса горячих электронов плазменного слоя. Типичные значения резонансных энергий электронов составляют несколько кэВ. В самом деле, такие волны неэффективны при рассеянии высокоэнергичных электронов.

**1.1. Анализ отдельных случаев.**

1.1.1. Явление, связанное с волнами типа свистов. Первоначально анализ был ограничен поиском рассеяния в режиме сильной диффузии электронов с энергиями выше 235 кэВ. Вероятно, в силу жесткости этого критерия удалось выявить только семь случаев, которые можно было отнести к рассеянию, связанному со свистовыми волнами. Во всех случаях они относились к позднему утреннему сектору, где появление хоров максимально. Рассеяние наиболее значительно в самом низкоэнергичном (33 кэВ) канале, ослабевая при переходе к более высоким энергиям. Не обнаружено никакого одновременного высыпания ионов.

1.1.2. Явление, связанное с электромагнитной ионно-циклотронной волной. В данных за 14 месяцев только четыре события удовлетворяют критерию, определяющему рассеяние электронов электромагнитными ионно-циклотронными волнами. Все они наблюдались на малых L вблизи вечернего меридиана, где такие волны предпочтительно возбуждаются. Не наблюдалось никакого высыпания электронов при энергиях ниже 160 кэВ. При 235 кэВ имеются данные, что конус потерь частиц частично заполнен. По мере увеличения энергии электронов интенсивность рассеяния прогрессивно растет, достигая уровня рассеяния в режиме сильной диффузии на энергиях более 850 кэВ. Ограниченная по широте область высыпания релятивистских электронов погружена в более широкую зону высыпания ионов в режиме сильной диффузии.

1.1.3. Явление, связанное с электростатической ионно-циклотронной волной. Большая часть (302 случая) выявленных событий имеет особенность, характерную для рассеяния частиц электростатическими ионно-циклотронными волнами: широкий интервал энергий изотропного потока высыпающихся электронов, сопровождающихся высыпанием ионов в режиме сильной диффузии. Как правило, такие высыпания имеют место вблизи верхнего предела значений L для области захваченных энергичных электронов, однако, заведомо в пределах внешней границы захвата, связанной с переходом в область незамкнутых геомагнитных силовых линий полярной шапки. Такие события сильно преобладают на ночной стороне в пределах интервала широт, характерного для овала полярных сияний (рис 2) (1). Это согласуется с процессом паразитного рассеяния высокоэнергичных электронов, которые переносятся градиентным дрейфом в зону постоянно существующей сильной турбулентности, связанной с ионными модами, на широтах ночного сектора овала полярных сияний. Смещение к экватору области высыпаний релятивистских электронов во время возмущений согласуется с установленным смещением овала полярных сияний во время суббурь.

Итак, осаждение энергичных электронов в атмосферу может быть как основным источником ионизации области D , так и привести к образованию добавочного количества молекул водорода и азота, которые, как известно, могут выполнять роль разрушающих озон катализаторов на высотах средней атмосферы. В результате возрастания количества водорода чрезвычайно жесткие по энергиям и интенсивные ВРЭ, описанные выше, могут привести к локальному уменьшению озона (~30 %) в мезосфере на субавроральных широтах. При наблюдаемой 5 – 10 % частоте появлений подобные события становятся также основным источником в течение года окиси азота в субавроральной мезосфере, и их воздействие может быть существенным даже в верхней стратосфере. Более того, поскольку наш анализ данных спутника ограничен небольшим числом типов событий, характеризующихся наличием режима сильной диффузии в высыпании релятивистских (> 230 кэВ) частиц, приведенные выше оценки сопутствующих атмосферных эффектов является весьма умеренными. События в режиме слабой диффузии, а также события с участием электронов меньших энергий, происходят гораздо чаще, и становятся существенными эффекты постепенного накопления. Реальность этого предположения подтверждена экспериментами.

(Основным источником энергии ионизации D слоя ионосферы являются энергичные частицы: электроны и протоны.)

## Рис 2. Общая морфология ВРЭ, наблюдаемых на спутнике S3-3 в периоды средних (A<20) и высоких (A>20) возмущений. Отмечены события, связанные с рассеянием на свистовых () и электромагнитных ионно-циклотронных () волнах. Все остальные события относятся к рассеянию электростатическими ионно-циклотронными волнами.



# 2.Изучение кинетических методов исследования.



(Здесь будут рассмотрены воздействие высокоэнергичных частиц, высыпающихся из магнитосферы, и ионосферы в кинетическом рассмотрении, т.е. без учета плазменных волн или колебаний магнитной силовой трубки.)

Взаимодействие между магнитосферой и ионосферой происходит по двум каналам, один из которых можно назвать корпускулярным, связанный с вторжением энергичных частиц, а другой – волновым, осуществляющим передачу электрических полей и продольных токов. Сначала рассмотрим первый.

Некоторое количество протонов и электронов, захваченных на силовой линии геомагнитного поля, будут иметь зеркальные точки в атмосфере на высоте не менее 100 км. Проникающие в атмосферу частицы сталкиваются с атомами и молекулами атмосферы и постепенно отдают свою энергию нейтральным атомам и молекулам. Главным стоком энергичных заряженных частиц магнитосферы является атмосфера, по крайней мере, в области, характеризующейся высокими значениями L (например, L>5).

Заряженные частицы при вторжении испытывают ряд упругих и неупругих столкновений с атомами и молекулами атмосферы. Они постепенно расходуют свою энергию: а) на ионизацию и возбуждение нейтральных частиц воздуха и б) на излучение энергии при ускорении в кулоновском поле атомных ядер (тормозное рентгеновское излучение). Для частиц низких энергий (т.е. электронов с энергиями <1 МэВ) второй процесс потери энергии несущественен, но его эффект весьма важен , поскольку при этом процессе генерируются рентгеновские лучи, которые можно использовать для косвенных исследований энергичных частиц.

Следствия процесса ионизации и возбуждения в верхней атмосфере можно исследовать по изменениям диэлектрической постоянной верхней атмосферы и оптических излучений из этих областей. Наблюдались оптические полярные сияния, для возбуждения которых необходима энергия, превосходящая общую энергию всех энергичных электронов, запасённых во всей магнитосфере. Это доказывает, помимо всего прочего, эффективность атмосферы как стока для энергичных частиц.

Чтобы количественно исследовать влияние столкновений частиц на различные явления в верхней атмосфере, необходимо знать, как происходит в верхней атмосфере диссипация энергии частиц. Кроме того, детальное влияние морфологии нерегулярной, вызванной частицами ионизации в верхней атмосфере может способствовать лучшему пониманию временных вариаций потоков частиц.

Примерная глубина проникновения протонов и электронов различных энергий представлена на рис. 3 (2), поскольку высыпание частиц – процесс статистический, фактическая глубина проникновения не постоянна для всех частиц с одинаковыми начальными условиями. Значения, приведённые на рис. 3 (2), следует, таким образом, рассматривать как средние высоты на которых большая часть энергии поглощается при неупругих столкновениях в предположении, что частицы проникают в атмосферу вертикально.

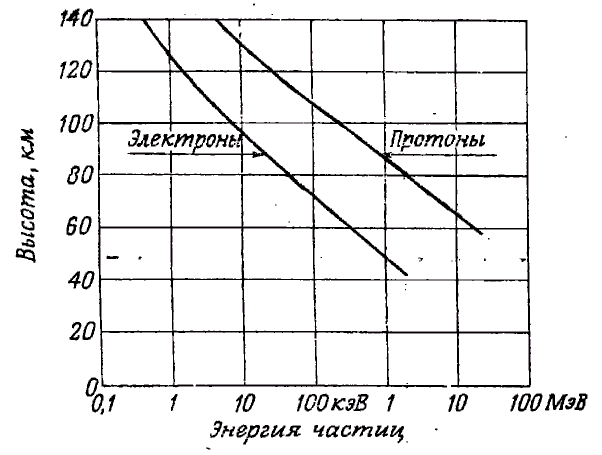
Поскольку глубина проникновения в значительной степени зависит от энергии (рис. 3) (2), различные участки энергетического спектра частиц влияют на различные слои атмосферы. Только электроны и протоны с энергиями более 10 кэВ и 200 кэВ соответственно могут проникнуть ниже 100 км и ионизировать область D, а ионизация области F может вызываться только частицами с энергиями сотни эВ.

Статистически энергетический спектр электронов и протонов с возрастанием широты становится мягче. Поэтому следует ожидать, что вклад вторгающихся частиц в ионизацию имеет место в полярных областях на большей высоте, чем в средних широтах. Высыпание частиц в средних широтах влияет, по-видимому, только на область D . В зоне полярных сияний ионизация областей D и F до некоторой степени поддерживается частицами, тогда как внутри полярных шапок вторгающиеся частицы в нормальных условиях, по-видимому, ионизируют только верхнюю часть ионосферы. Спорадическая ионизация может изменять эту картину, особенно в полярных областях, где высокоэнергичные протоны солнечного происхождения временами вызывают значительное усиление ионизация в нижней части области D.

**2.1. Электроны.**

2.1.1. Потеря энергии и рассеяние. Энергичный электрон, проникающий в верхнюю атмосферу, в результате неупругих столкновений с молекулами воздуха постепенно теряет свою энергию W . Средняя потеря энергии на одно неупругое столкновение составляет для энергичных электронов (т.е. W>500 эВ)

## Рис. 3. Глубина проникновения частиц при вертикальном вхождении в атмосферу Земли.



около 90 эВ. Эта энергия сообщается связанному электрону, который оторвется от исходного атома с энергией, достаточно высокой, чтобы ионизовать еще два атома.

Средний атомный номер в верхней атмосфере равен 7,3, при этом предполагается, что относительное содержание молекул кислорода и азота составляет 3:7. Кроме того, что сечение рассеяния двухатомной молекулы вдвое больше, чем сечение одного атома (что не всегда справедливо). Скорость потери энергии в воздухе показана на рис. 4 (2). По этим данным можно установить остаточный пробег электрона с данной энергией W , определяемый формулой:

. (3)



Если отклонения траектории электрона, вызванные упругими столкновениями, были незначительными, по формуле (3.) легко определить полную глубину проникновения. Но траектория электрона сильно отличается от прямой линии, поэтому в общем случае решить эту задачу аналитически очень трудно, и только в нескольких численных решениях полностью учтены эффекты сложного движения электронов.

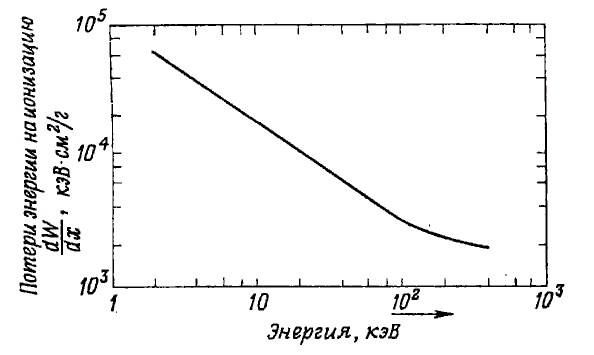
Отклонения траектории электрона обусловлены главным образом упругими столкновениями с атомами атмосферы (т.е. кулоновским рассеянием). Сечения упругих и неупругих столкновений достаточно хорошо известны вплоть до энергий, превышающих несколько кэВ. Известно, что на каждое неупругое столкновение электрона приходится от 5 до 10 упругих столкновений. Если средняя потеря энергии на одно неупругое столкновение составляет около сотни эВ. То электрон должен испытывать приблизительно 100 упругих столкновений, прежде чем потеря энергии достигнет 1 кэВ. Следовательно, с начальной энергией около 50 кэВ «забудет» об исходном направлении своего движения задолго до того, как он остановится, даже если средний угол рассеяния при каждом упругом столкновении мал. Все вычисления основаны на предположении о горизонтальной стратификации атмосферы и о вертикальном расположении силовых линий геомагнитного поля (что достаточно хорошо выполняется на высоких широтах).

Сначала находят траекторию электрона. Выбираются три произвольных параметра, которые дают: а) расстояние, проходимое до следующего упругого или неупругого соударения; и б) направление движения после столкновения. Распределение этих трех произвольных чисел определяется сочетаниями, представленными на рис. 5 (2).

Процесс продолжается до тех пор, пока: а) первичный электрон не израсходует всю свою энергию или; б) электрон не уйдет из атмосферы как электрон альбедо. Чтобы получить статистически достоверные результаты, необходимо рассмотреть достаточно большое число первичных электронов, больше чем 10 000.

2.1.2. Обратное рассеяние энергичных электронов атмосферой. Электроны альбедо не дают существенного вклада в ионизацию верхней атмосферы, поэтому для количественного сопоставления ионосферных процессов и потоков частиц над атмосферой важно знать, какая часть вторгающихся электронов отражается атмосферой. Коэффициент отражения не зависит существенно от энергии. Однако средняя потеря энергии для электронов альбедо существенно изменяется с изменением угла вхождения в атмосферу от 30 до 10 % для электронов с первоначальными питч-углами 30 и 80\* соответственно.

2.1.3. Поглощение высокоэнергичных электронов в атмосфере. Влияние атмосферного рассеяния на пучок моноэнергетических электронов приведено на рис. 6,(2), где показано вертикальное ослабление пучка электронов, первоначально имеющих одно и тоже направление, с энергией 50 кэВ, входящего в атмосферу под углом 55\*.Электроны, прежде чем успеют израсходовать всю свою энергию, проникают до высоты 80 км, но уже на высоте 150 км пучок обнаруживает значительное угловое расширение. Уширение пучка еще яснее видно на высоте 100 км, где начинается уменьшение энергии электронов. На высоте 90 км «непоглощенные» электроны можно наблюдать только в направлении, близком к вертикальному, в то время как малоэнергичные электроны имеют очень широкое распределение по углам. На основании этого приема модно заключить, что энергетический спектр первоначально параллельного и моноэнергетического пучка электронов, который рассеялся и поглотился в атмосфере, имеет очень сложные питч-уговое и высотное распределения. Изотропные потоки электронов наблюдаются только при самых низких энергиях почти в конце траектории, т.е. между 80 и 85 км для

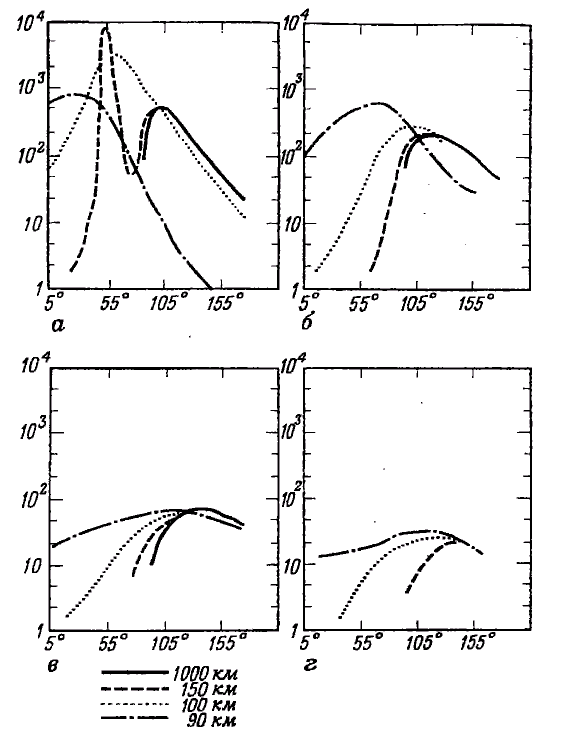


**Рис. 4. Характерные потери энергии для электронов в воздухе.**

## Рис. 5 Полное сечение дифференциального рассеяния электронов с энергиями от 1 до 500 кэВ.



## Рис. 6. Угловое распределение рассеянных электронов (W0=50 кэВ, угол вхождения 55\*) в интервалах энергий: а) 44 – 54 кэВ, б) 36 – 44 кэВ, в) 30 – 36 кэВ, г) 17 – 30 кэВ.



использованных в данном приеме электронов. При тщательном анализе данных, представленных на рис. 6, (2), видны очень незначительные высотные вариации в потоках электронов альбедо (на высоте более 100 км). Следовательно, рассеяние, заставляющее возвращаться электроны назад в космическое пространство, имеет место почти в конце траектории.

Ограничимся тем, что представим высотный профиль потери энергии для первичных электронов некоторых энергий и нескольких углов входа их в атмосферу.

Зависимость высотных профилей потери энергии электронов с энергией 6 и 50 кэВ от угла падения показана на рис. 7 и 8 (2) соответственно. Электроны, пересекающие атмосферу в почти вертикальном направлении, создают максимум ионизации, который в 100 – 1000 раз больше максимума, вызванного электронами, входящими в атмосферу под большими зенитными углами. Сильная зависимость от зенитного угла объясняется отчасти тем, что энергия быстрого электрона, движущегося под большим зенитным углом, будет распределяться по горизонтальной площади, которая пропорциональна секансу зенитного угла. Однако более существенны значительные вариации потока электронов альбедо в зависимости от питч-углов.

В образовании ионизации на больших высотах наиболее эффективны электроны, входящие в атмосферу под зенитным углом 60\*. Является до некоторой степени неожиданным отсутствие зависимости максимума высоты от первоначального питч-угла электронов в отличие то подобных вариаций, наблюдаемых в ионосферном слое, образованным солнечным излучением. Причина кажущегося постоянства максимума, заключается в том, что: а) вследствие небольшого отношения сечений упругих и неупругих столкновений энергичные электроны сильно отклоняются от начального направления движения задолго до того, как поглотятся и б) возможные незначительные различия в высоте максимума трудно обнаружить из-за большого градиента плотности нейтральной атмосферы.

**2.2. Протоны.**

Вторжение энергичных протонов вызывает ионизацию и возбуждение в верхних слоях атмосферы в основном тем же путем, что и вторжение электронов. Однако, обладая большой массой, они почти не испытывают сколько-нибудь заметных отклонений при столкновении с атомами атмосферы. Таким образом, в первом приближении можно полагать, что угол между вектором локального магнитного поля и вектором скорости протона остается постоянным в рассеивающей среде, по мере того как скорость протона постепенно уменьшается.

Проблема вычисления диссипации энергии протона могла бы показаться тривиальной, если бы не процесс перезарядки. По мере проникновения во внешнюю область атмосферы протоны выбивают связанные электроны из атомов. Эффективные сечения перезарядки водорода и кислорода почти одинаковы, но вторая более важна, так как содержание кислорода на несколько порядков величины превосходит содержание водорода.

Основной эффект процесса перезарядки заключается в том, что вторгающиеся протоны распределяются по большой горизонтальной площади. Ионизированный атом водорода направляется магнитным полем, тогда как нейтральный атом может двигаться на большие расстояния, не испытывая воздействия поля. Важность процесса перезарядки усиливается тем фактором, что средняя длина свободного пробега нейтрального водорода с энергией 5 кэВ до перезарядки на высотах от 150 до 500 км возрастает в 5 – 20 раз по сравнению с длиной свободного пробега протона с той же энергией. Следовательно, атом водорода пребывает большую часть времени в нейтральном состоянии. Первоначально узкий пучок протонов может быть «размазан» вследствие процессов перезарядки по большому интервалу широт.

Из-за процесса перезарядки проблема вычисления диссипации пучка становится двумерной. Только когда вторжение протонов происходит на большой горизонтальной площади, связь энергетического спектра частиц с вертикальным профилем потерь энергии имеет смысл. В этом случае можно не учитывать процесс перезарядки, поскольку эффективные сечения столкновений для нейтрального водорода и протонов почти одинаковы.

Глубина проникновения в атмосферу протонов различных энергий показана на рис. 9 (2). Поскольку упругие столкновения несущественны для протонов средних энергий, глубина проникновения изменяется в зависимости от угла вхождения в атмосферу, в противоположность тому, что происходит с энергичными электронами. Протон,

**Рис. 7. Профили скорости потери энергии для электронов с Wо=6 кэВ и углом падения Q.**



**Рис. 8. профили скорости потери энергии для электронов с Wо=50 кэВ.**

**Рис. 9. Глубина проникновения протонов в атмосферу в функции питч-угла.**



входящий вертикально в атмосферу, проникает приблизительно на 20 км глубже, чем протон с зенитным углом 80\*.

На рис. 10 (2), представлены вертикальные профили скорости потери энергии первоначально изотропных моноэнергетических потоков протонов. Горизонтальное рассеяние, вызванное процессами перезарядки, в вычислениях не учитывалось. Вычисления основаны на коэффициентах поглощения, приведенных на рис. 11 (2).

Высота максимальной потери энергии уменьшается от ~ 200 км до ~ 90 км, в то время как энергия протонов возрастает от 1 до 1000 кэВ. Новые модели атмосферы, возможно, каким-то образом уменьшать эти высоты, но маловероятно, чтобы в результате этого профили сместились более чем на 5 км.

Вследствие существования градиента плотности в атмосфере «толщина» профилей потери энергии уменьшается с возрастанием энергии протонов, и к тому же максимум в профиле резко возрастает. Следовательно, при изменении энергии протонов от 1 до 1000 кэВ максимальные потери энергии увеличиваются в 60 000 раз.

(Электроны и протоны по-разному ведут себя, проникая в ионосферу. Электроны, после небольшого числа столкновений, «забывают» о своем первоначальном направлении. Протоны же, в процессе перезарядки, проникают гораздо глубже, так как нейтральный атом не испытывает кулоновского рассеяния.)

# Рис. 10. Профили скорости потерь энергии протонов с начальной энергией Wо, кэВ.



# Рис. 11. Скорость потери энергии для протонов в воздухе в зависимости от энергии.

# 3.Изучение гидродинамических методов исследований.

(В этой главе будут рассмотрены различные типы взаимодействий волн с частицами.)

Рассмотрим другой канал связи – волновой, осуществляющий передачу электрических полей и продольных токов.

Волновой канал настолько тесно связывает элементы магнитосферно-ионосферной системы, что можно говорить о единой электрической цепи, в которой почти любой процесс является совместным продуктом магнитосферы и ионосферы. Некоторые из высыпаний, в частности дискретные дуги полярных сияний, управляются из ионосферы. Обратная связь осуществляется посредством волнового канала. Схема обратной связи выглядит следующим образом. Вторгающийся поток меняет проводимость ионосферы. В присутствии внешнего электрического поля область меняющейся проводимости генерирует гидромагнитную волну, направленную геомагнитным полем. Распространяясь в магнитосферу, гидромагнитная волна взаимодействует с частицами, заставляя их при некоторых условиях высыпаться, (но пока не известен конкретный механизм взаимодействия гидромагнитной волны с частицами). Можно предложить два варианта передачи этой энергии частицам. В первом варианте волна меняет магнитное поле в силовой трубке, модулируя поток энергичных частиц. Во втором – происходит ускорение «холодных» частиц в продольном электрическом поле волны.

## 3.1. Модуляция потоков энергичных частиц гидромагнитными волнами.

Предположим, что существует фоновое высыпание частиц, обусловленное, например, диффузией в конус потерь. Найдем глубину модуляции высыпающегося потока в зависимости от амплитуды геомагнитных пульсаций, которые можно связывать со стоячей альвеновской волной, захваченной между магнитосопряженными участками ионосфер различных полушарий. Известно, что направляемые альвеновские волны не сопровождаются сжатием магнитного поля. Однако, в неоднородном магнитном поле каждая колеблющаяся магнитная силовая линия будет испытывать субстанциональные сжатия и разрежения. Магнитное поле в такой колеблющейся трубке меняется по закону:

, (4)



где - колебательная скорость трубки. Плазма, вмороженная в трубку, колеблющуюся в меридиальной плоскости, испытывает периодическое нагревание и охлаждение, что приводит к вариациям частиц в трубке с периодом ее поперечных колебаний. Вариации потока частиц на уровне ионосферы существенно зависят от характера изменений питч-углового распределения частиц. Рассмотрим четыре случая, отличающихся характером изменения функции распределения, а также энергией частиц. Вначале найдем связь глубины модуляции с амплитудой колебаний в экваториальной плоскости , а затем с амплитудой пульсаций на поверхности Земли.



3.1.1. Случай быстрой изотропизации. Относительное изменение потока может быть найдено из теоремы Лиувилля и определяется выражением:

. (5)



где - поток частиц в единице телесного угла и в единичном интервале энергий , - возмущенные величины.



Поперечные радиальные колебания трубки сопровождаются изменением ее объема. Предполагая процесс адиабатическим, из уравнения адиабаты находим связь между изменением энергии частиц и изменениями объема:



. (6)



Рассмотрим первую гармонику колебаний. Считаем для простоты, что объем трубки пропорционален ( - геоцентрическое рассеяние до трубы в экваториальной плоскости в радиусах Земли). Имеем:



. (7)



Подставляя (7.3) и (7.4) в (7.2), получаем для зависимости



. (8)



Последнее равенство написано для , .



3.1.2. Случай сохранения адиабатических инвариантов. Этот случай, вероятно, реализуется в спокойное время вдали от ярких форм сияний. Высыпание частиц в ионосферу связано при этом с сокращением магнитных силовых линий в процессе стационарной конвекции магнитосферной плазмы. Хотя с приближением магнитной силовой линии к Земле питч-углы заряженных частиц увеличиваются, конус потерь увеличивается еще быстрее. Высыпающийся поток примерно равен , где и - концентрация частиц и скорость их радиального дрейфа в экваториальной плоскости. Модуляция потока имеет вид:



. (9)



Где - возмущение скорости, связанное с гидромагнитной волной; - частота волны; - радиус Земли. Полагая частоту равной частоте резонансных колебаний магнитной трубки (), получаем:



. (10)



Последнее равенство выполняется при характерных значениях км/с и км/с.



3.1.3. Модуляция инкремента нарастания свистовой моды. Предполагается, что фоновое высыпание вызвано диффузией частиц в конус потерь из-за резонансного взаимодействия со свистовой модой. Эта мода непрерывно генерируется благодаря анизотропии распределения электронов по питч-углам. Инкремент нарастания свистовой моды зависит от внешнего магнитного поля. Гидромагнитная волна, возмущая магнитное поле, изменяет инкремент свистовой моды, что приводит к модуляции коэффициента диффузии и, следовательно, к модуляции высыпающегося потока. В качестве гидромагнитной волны мы принимали магнитозвуковую. Однако, как видно из формулы (4), направляемая альвеновская волна в неоднородном поле также сопровождается субстанциональными изменениями магнитного поля.

Если диффузия в конус потерь не слишком велика, высыпающийся поток равен:

, (11)



где - фоновый поток; - коэффициент анизотропии электронов по питч-углам; и -температуры электронов поперек и вдоль внешнего магнитного поля; -амплитуда малых вариаций. Принимая для экваториальной плоскости , и считая колебания малыми, получаем из (11) глубину модуляции



. (12)



Сравнение (12) с (8) показывает, что коэффициент анизотропии обеспечивает диффузию, промежуточную между сильной и слабой. Уменьшение приводит к уменьшению диффузии и к увеличению глубины модуляции. В данном случае глубина увеличивается за счет уменьшения фононовоо потока.



3.1.4. Модуляция потоков высокоэнергичных частиц. При рассмотрении трех предыдущих случаев предполагалось, что частицы колеблются вместе с магнитной трубкой. При характерном диаметре трубки в экваториальной плоскости и периоде колебаний условие сохранения частиц в трубке выполняется для энергий . Частицы больших энергий будут протекать через трубку (вследствие градиентного дрейфа), почти не реагируя на ее колебания. Можно считать, что магнитная силовая трубка колеблется на неподвижном фоне энергичных частиц. Колеблющаяся трубка, подобно зонду, будет проектировать в свое основание частицы из разных областей ионосферы. Магнитосфера заселена энергичными частицами неоднородно. Поэтому поток частиц, высыпающихся из трубки, будет флуктуировать. Полагая, что фоновый поток энергичных частиц меняется по закону:



, (13)



получаем глубину модуляции:

. (14)



Последнее равенство выполняется при характерных значениях , , . Изменение потока происходит в фазе или противофазе с может быть выражено через магнитное поле стоячей альвеновской волны:



, (15)



где -северная компонента поля над ионосферой; и внешнее магнитное поле в экваториальной плоскости и на уровне ионосферы соответственно. При выводе (15) предполагалось, что альвеновская скорость постоянна вдоль силовой трубки, трубка совершает колебания на основной гармонике, концы трубки закреплены на ионосфере.



Поле не проникает ниже ионосферы, так как полностью экранируется педерсеновскими токами. Под ионосферой чувствуется магнитное возмущение , связанное с холловскими токами:



, (16)



где и - проинтегрированные по высоте холловская и педерсеновская проводимости; поле считается положительным, если оно направлено на восток. Подставляя (16) в (15) и полагая , и , получаем:



, (17)



где выражено в нТл.

Возвращаясь к выражениям (8), (10), (12) и (14), запишем с учетом (17) относительную вариацию потока:

, (18)



где величина коэффициента для четырех рассмотренных случаев принимает соответственно решения ; и . Наиболее благоприятен для модуляции случай 2 (сохранение инвариантов); при амплитуде колебаний получаем в этом случае . Случаи 1,3 и 4 способны вызвать только 10 –20 %-ную модуляцию потоков частиц. Напомним, что случай 1 (быстрая изотропизация) дает нижний предел для глубины модуляции низкоэнергичных (<30 кэВ) частиц; уменьшение питч-угловой диффузии приведет к увеличению глубины модуляции.



Следует отметить своеобразие случая 4. Несмотря на почти полное отсутствие взаимодействия колеблющейся трубки с высокоэнергичными частицами, высыпающийся поток испытывает довольно сильную модуляцию.

## 3.2. Продольные электрические поля.

Наиболее убедительным доказательством существования продольных электрических полей являются часто наблюдаемые потоки частиц с питч-углами, сосредоточенными вблизи . Такие потоки наблюдаются как в ионосфере, так и в магнитосфере, свидетельствуя о наличии продольной разности потенциала порядка нескольких киловольт. Механизм возникновения продольного поля неясен, но можно выделить несколько возможных источников : 1) различная питч-угловая анизотропия электронов и протонов; 2) термоэлектрический эффект на границе между горячей магнитосферой и холодной ионосферной плазмой; 3) продольный ток, переносимый горячими электронами с учетом сходимости магнитных силовых линий; 4) аномальное сопротивление; 5) двойной сой; 6) нехватка холодной плазмы.



(Из вышеизложенного видно, что волновое взаимодействие нельзя не учитывать, рассматривая высыпание высокоэнергичных частиц. Такое взаимодействие вносит ощутимый вклад в ионизацию ионосферы.)

# 4. Теоретические оценки эффектов в нижней ионосфере.

(В этой главе будут даны оценки различным магнитосферно-ионосферным взаимодействиям)

Рассмотрев два метода исследования нижних слоев ионосферы, можно сделать некоторые оценки различных эффектов и сравнить их. Оценим корпускулярное взаимодействие.

Глубина проникновения частиц в ионосферу в значительной степени зависит от их энергии. Как видно из рис. 3 (2), различные участки энергетического спектра частиц влияют на различные слои атмосферы. Только электроны и протоны с энергиями более 10 кэВ и 200 кэВ соответственно могут проникнуть ниже 100 км и ионизировать область D, а ионизация области F может вызываться только частицами с энергиями сотни эВ.

Так, чтобы проникнуть вглубь ионосферы до высоты 100 км, электрон (в среднем) должен иметь энергию 9 кэВ, а протон, – должен иметь энергию 300 кэВ. Итак, не смотря на более благоприятные условия проникновения для протонов (процесс перезарядки), они все же должны иметь более высокую энергию, по сравнению с электронами, чтобы проникнуть на такую же глубину. Электрон, обладая энергией 100 кэВ, проникает до высоты 70 км, а протон, с аналогичной энергией, - только до высоты 110 км.

Статистически энергетический спектр электронов и протонов с возрастанием широты становится мягче. Поэтому следует ожидать, что вклад вторгающихся частиц в ионизацию имеет место в полярных областях на большей высоте, чем в средних широтах. Высыпание частиц в средних широтах влияет, по-видимому, только на область D. Но степень ионизации ионосферы зависит не только от энергии частиц, но и от угла, род которым частица входит. Электроны, пересекающие атмосферу в почти вертикальном направлении, создают максимум ионизации, который в 100 – 1000 раз больше максимума, вызванного электронами, входящими в атмосферу под большими зенитными углами. Сильная зависимость от зенитного угла объясняется отчасти тем, что энергия быстрого электрона, движущегося под большим зенитным углом, будет распределяться по горизонтальной площади, которая пропорциональна секансу зенитного угла. К примеру, в образовании ионизации на больших высотах наиболее эффективны электроны, входящие в атмосферу под зенитным углом 60\*.

До некоторой степени является неожиданным отсутствие зависимости максимума высоты ионизации от первоначального питч-угла электронов в отличие то подобных вариаций, наблюдаемых в ионосферном слое, образованным солнечным излучением. Причина кажущегося постоянства максимума, заключается в том, что: а) вследствие небольшого отношения сечений упругих и неупругих столкновений энергичные электроны сильно отклоняются от начального направления движения задолго до того, как поглотятся и б) возможные незначительные различия в высоте максимума трудно обнаружить из-за большого градиента плотности нейтральной атмосферы.

Итак, можно сделать вывод, что максимальны вклад в ионизацию нижнего слоя D ионосферы, дают электроны, входящие в атмосферу в вертикальном направлении. Теперь оценим волновое взаимодействие.

Распространяясь в магнитосферу, гидромагнитная волна взаимодействует с частицами, заставляя их при некоторых условиях высыпаться. Можно предложить два варианта передачи этой энергии частицам. В первом варианте волна меняет магнитное поле в силовой трубке, модулируя поток энергичных частиц. Во втором – происходит ускорение «холодных» частиц в продольном электрическом поле волны.

Случаи «быстрой изотропизации», «модуляции инкремента нарастания силовой моды» и «модуляции потоков высокоэнергичных частиц» (все случаи описаны выше) способны вызвать только 10 –20 %-ную модуляцию потоков частиц. Следует отметить своеобразие случая «модуляции высокоэнергичных частиц». Несмотря на почти полное отсутствие взаимодействия колеблющейся трубки с высокоэнергичными частицами, высыпающийся поток испытывает довольно сильную модуляцию. Частицы больших энергий будут протекать через трубку, почти не реагируя на ее колебания. Можно считать, что магнитная силовая трубка колеблется на неподвижном фоне энергичных частиц. Колеблющаяся трубка, подобно зонду, будет проектировать в свое основание частицы из разных областей ионосферы.

Из рассмотренного видно, что более весомый вклад в ионизацию нижних слоев ионосферы дает корпускулярное взаимодействие, но и волновым взаимодействием не стоит пренебрегать; так как в первом случае частицы высыпаются из радиационного пояса под углом близким к 0\* (давая максимальную ионизацию), а во втором – частицы модулируются из различных слоев ионосферы под различными углами (не имея яркой зависимости от угла вхождения в атмосферу).

(Самый большой вклад в ионизацию верхней атмосферы дают высокоэнергичные электроны, высыпающиеся вертикально, или близко к 0\*.)

# Заключение.

Рассмотрев некоторые из видов ионосферно-магнитосферных взаимодействий, можно сделать вывод, что взаимодействие происходит, по крайней мере, по двум каналам: волновому и корпускулярному. Оба вида взаимодействий достаточно подробно были рассмотрены.

Высыпание энергичных частиц в ионосферу на средних широтах требует особых условий. Таких как: высокая энергия, которой должна обладать частица, малый питч-угол, чтобы иметь возможность вырваться из магнитной силовой трубки, или необходимы сильные возмущения магнитных силовых линий, вдоль которых движутся частицы в магнитосфере. Такие высыпания редки

Чтобы вызвать такие высыпания искусственно, необходимо излучить в ионосферу радиоимпульс большой мощности.

Подобные высыпания дополнительно локально ионизируют верхние слои атмосферы, увеличивая степень неоднородности. Такие события не слишком благоприятно влияют на прохождение и отражение радиоволн, так как в ионосфере появляются дополнительные неоднородности, искажающие фазовый фронт волны.

В данной курсовой работе проведены исследования методов изучения взаимодействия энергичных частиц с нижними слоями ионосферы. Сделаны оценки взаимодействий различных частиц (отдельно электронов и протонов) с ионосферой; также рассмотрены причины их высыпаний и следствия в зависимости от параметров частицы и волны, которая взаимодействует с такой частицей. Это может быть глубина проникновения, степень ионизации от энергии частицы, ее питч-угла, или же от вида этой частицы (протон или электрон0

Представленные в данной работе методы исследования высыпаний энергичных частиц – далеко не большая часть из всех существующих. Здесь были рассмотрены только самые основные.

# Литература.

1. Либов Р. Введение в теорию кинетических уравнений. –М,: Мир, 1974. – 371 с.
2. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. –М.: Наука, 1988 – 192 с.
3. Полярная верхняя атмосфера. –М,: Мир, 1983 – 456 с.
4. Хир К. Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы. –М,: Наука 1988 – 600 с,
5. Космическая геофизика. –М,: Мир, 1976 – 544 с.