



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
(бакалаврская работа)

На тему: «Баланс токов в глобальной атмосферно-электрической цепи

»

Исполнитель Абдуселимов Артемий Аликеримович
(фамилия, имя, отчество)

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

Кашлева Лариса Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Сероухова Ольга Станиславовна
(фамилия, имя, отчество)

« 22 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

ВВЕДЕНИЕ

Электрические свойства атмосферы и электрические явления, в ней происходящие, имеют существенное значение для многих метеорологических процессов. Они являются одними из основных характеристик атмосферы. Кроме того, электрические параметры атмосферы нередко значительно влияют на работу многих производственных процессов в современном техническом мире. Очевидно, что анализ электрического состояния атмосферы имеет непреходящее практическое значение для деятельности человека, и, поэтому, мы должны рассмотреть поближе и анализировать все электрические свойства атмосферы. Но, если бы в атмосфере существовал только ток проводимости, то потенциалы ионосферы и земли сравнялись бы через несколько часов. Но глобальное электрическое поле существует постоянно. Это означает, что существуют процессы, посредством которых этот ток компенсируется.

Данное исследование направлено на то, чтобы изучить токи в глобальной атмосферно-электрической цепи и выявить их баланс.

Целью данной работы является проведение исследований входящих космических лучей. Куда уходят отрицательные заряды после прохождения лучами магнитную сферу. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Проведение всестороннего анализа информации о глобально-электрической цепи.
- 2) Проведение всестороннего анализа частиц, появившихся в результате взаимодействия земной атмосферы и космических лучей.
- 3) Проведение расчетов и анализ результатов.

В первой главе на основе литературных источников описываются основные гипотезы возникновения электрического поля и описание глобальной атмосферно электрической цепи.

Вторая глава посвящена рассмотрению такого явления, как космические лучи

В третьей главе мы рассматриваем роль космических лучей в поддержании баланса токов в глобальной атмосферно-электрической цепи, анализируем полученные данные расчетов.

ГЛАВА 1. ГЛОБАЛЬНАЯ АТМОСФЕРНО ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ

Глобальная Атмосферно-Электрическая Цепь — это сложный и необходимый для изучения феномен, который ученые изучают уже много лет.

1.1 ОСНОВНЫЕ ГИПОТЕЗЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В АТМОСФЕРЕ

Начало изучению атмосферного электричества было положено в XVIII веке американским учёным Бенджамином Франклином, экспериментально установившим электрическую природу молнии, и русским учёным Михаилом Ломоносовым — автором первой гипотезы, объясняющей электризацию грозовых облаков. В XX веке были открыты проводящие слои атмосферы, лежащие на высоте более 60—100 км (ионосфера, магнитосфера Земли), установлена электрическая природа полярных сияний и обнаружен ряд других явлений.

В 1860-х годах Уильям Томсон, более известный как лорд Кельвин, предположил, что в верхних слоях атмосферы существует проводящий слой, который имеет связь с явлениями атмосферного электричества. Он считал, что газы при низком давлении могут вести себя как проводники. Кроме того, он предложил идею, что Земля и проводящий слой ведут себя как огромный конденсатор. Эта идея стала основой современной теории глобальной атмосферно-электрической цепи.

Анализируя доказательства того, что суточное изменение напряженности электрического поля по отношению к универсальному времени было одинаково для станции по всему миру, в 1920 году английский

исследователь Чарльз Вильсон разработал классическую теорию глобальной атмосферно-электрической цепи.

Альтернативной выступала теория советского учёного Я. И. Френкеля. В своих трудах он описывал электрическое поле атмосферы, создаваемое электрическими явлениями, происходящими преимущественно в тропосфере. Он считал поляризацию облаков и их взаимодействие с Землёй причиной возникновения электрических явлений, а ионосфера не играет существенной роли в этих процессах.

Однако, проведлось множество исследований на выявление истинности одной из этих теорий. В Ленинграде, измерения проводились под непосредственным руководством и при участии Е. В. Чубариной, в Киеве — И. В. Спасской и в Ташкенте — К.Э. Церфаса. Всего было проведено более 2000 измерений хода напряженности электрического поля с высотой.

1.2 КОНЦЕПЦИЯ ГЭЦ

В современной концепции ГЭЦ представляет собой распределенный токовый контур, образованный проводящими слоями ионосферы, стратосферы, тропосферы, слоя океана и земной коры, которые «замкнуты» электрически проводящей атмосферой. Источником электродвижущей силы в глобальной электрической цепи являются зоны грозовой активности. Эти высокоактивные зоны заряжают землю отрицательным зарядом, а высокие, хорошо проводящие слои атмосферы – положительным. Формируется своеобразный гигантский сферический конденсатор, в котором поверхность земли, в свою очередь, является нижней обкладкой. Верхней же частью токового контура является ионосфера, которая весьма подвержена влиянию физических процессов земного происхождения (например, высотные разряды в ионосферу) и внеземного (потoki заряженных частиц от Солнца, солнечные вспышки, галактические космические лучи и др.). Тропосфера и стратосфера играют

роль слоя диэлектрика между вышеуказанными слоями, в результате чего между землей и ионосферой образуется некоторая разность потенциалов. Поскольку диэлектрик обладает хорошей проводимостью, разность потенциалов, которая появляется на его обкладках, вызывает в зонах «хорошей погоды» появление токов, стремящихся разрядить конденсатор.

Величина образующихся токов пропорциональна разности потенциалов между землей и ионосферой. Вследствие процессов зарядки облаков конденсатора в зонах грозовой активности и разрядки в других областях Земли устанавливается некоторое равновесие в значении потенциала, которое, в свою очередь соответствует условию, что сумма заряжающих конденсатор токов равна сумме токов, разряжающих конденсатор. Таков общепринятый механизм Глобальной Атмосферно-Электрической Цепи. Стоит отметить, что суточный ход напряженности электрического поля во многом подобен суточному ходу интенсивности грозовой деятельности, рассчитанной для всего земного шара. Таким образом, ГЭЦ определяет в атмосфере баланс электрических токов, условия поддержания электрического поля, а также структуру указанных выше полей и токов.

1.3 СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ ГЭЦ

На рис.1.1 представлено схематическое изображение Глобальной



Электрической Цепи.

Рис. 1.1 – Схема ГЭЦ.

Слева указана область «нарушенной погоды» (зона «зарядки» глобального конденсатора). Это зона с высокой грозовой активностью. Общий ток в данной области складывается из тока осадков, тока молний, поступающих к поверхности земли, также тока острий и вертикального тока, текущих от нее. Соотношение между величинами плотности этих токов может отличаться в различные моменты времени и в разных областях планеты.

В правой части рисунка изображена область «разрядки» глобального конденсатора, так называемая зона «хорошей погоды». В областях «хорошей погоды» к поверхности земли течет вертикальный ток проводимости, который компенсируется токами обратного направления в тех областях, над которыми развивается грозовая активность. Области «зарядки» и «разрядки» замыкаются сверху токами, текущими в хорошо проводящих слоях верхней части стратосферы, а внизу – токами, текущими в литосфере. На рис. 2 указаны некоторые параметры Глобальной Атмосферно-Электрической Цепи. Учитывая эти величины, стоит рассмотреть каждую часть ГЭЦ подробнее.

Название параметра	Величина		
• Число гроз, действующих одновременно	1500 – 2000.	• Градиент потенциала	
• Токи над грозами:		• а) экватор	120 В/м,
• а) диапазон изменения величины	0.5 – 6.0 А,	• б) широта 60°	155 В/м,
• б) среднее значение	0.5 – 1.0 А.	• в) Южный полюс	71 В/м,
• Глобальный ток	750 – 2000 А.	• г) промышленные области	300-500 В/м
• Ионосферный потенциал:		• Электрическая проводимость	
• а) диапазон изменения величины	150 – 600 кВ,	• а) уровень моря	~10 ⁻¹⁴ См/м,
• б) среднее значение	280 кВ.	• б) тропопауза	~10 ⁻¹³ См/м,
• Сопротивление столба атмосферы:		• в) стратопауза	~10 ⁻¹⁰ См/м,
• а) низкие широты (над уровнем моря)	1.3×10 ¹⁷ Ом/м ² ,	• г) ионосфера (педерсеновская проводимость)	~1
• б) высокие широты (над уровнем моря)	3.0×10 ¹⁷ Ом/м ² ,	• ионосфера (параллельная проводимость)	~10 См/м
• в) Тибет и плато Антарктиды	2.0×10 ¹⁶ Ом/м ² .	• Время релаксации электрического заряда	
• Полное сопротивление с учетом влияния гор	230 Ом.	• а) 70 км	10 ⁻⁴ с
• Плотность тока:		• б) 18 км	4 с
• а) заселенные и индустриальные области	1.0×10 ⁻¹² А/м ² ,	• в) 10 м	5-10 мин
• б) растительная поверхность и пустыни	2.4×10 ⁻¹² А/м ² ,	• г) проводящая земля	10 ⁻⁵ с
• в) станции Южного полюса	2.5×10 ⁻¹² А/м ² .		

Таб. 1 – Параметры ГЭЦ.

Долгое время при изучении электрического поля у земной поверхности ставилась задача выявить общие для всего земного шара изменения напряженности электрического поля. С этой целью исследования старались вести измерения в те дни, когда местные факторы оказывали малое влияние на электрическое поле. Так как облака, туманы, пыльные и песчаные заметно сказываются на ходе поля, то дни с облачностью, сильным ветром, туманами обычно исключались из рассмотрения. Таким образом, в науке об атмосферном электричестве появилось понятие о днях «хорошей» погоды. Под «хорошей погодой» подразумеваются такие условия, при которых не присутствуют факторы, приводящие к изменению данных электрических характеристик в атмосфере. Таковыми являются осадки, туманы, ветер со скоростью более 3 м/с и облачность нижнего и среднего яруса. При этих условиях напряженность электрического поля над поверхностью земли часто оказывается положительной, и среднее ее значение можно принять равным 130 В/м (напряженность над океаном составляет 120 - 150 В/м, а над сушей – 75 - 125 В/м). Плотность электрического тока в области «хорошей погоды» составляет порядка 10-12 А/м², что дает ток 1700-1800 А.

Измерения электрического поля около поверхности земли в условиях отсутствия облачности, сильного ветра и осадков позволяют оценить некоторый эффективный заряд Земли, составляющий 105 Кл. Поскольку атмосфера Земли обладает электропроводностью, то при отсутствии источников электрическое поле в атмосфере исчезает примерно за 10 мин.

Основным источником электродвижущей силы ГЭЦ служат зоны земного шара, в которых наблюдается грозовая активность. Данные районы довольно часто называют зонами «нарушенной погоды» или зонами «зарядки ГЭЦ» по аналогии с зонами «хорошей погоды» или зонами «разрядки ГЭЦ». Для данной зоны характерна мощная кучево-дождевая и слоисто-дождевая облачность, в которой бурно воспроизводятся электрические процессы,

приводящие в скором времени к грозам. К грозовому электричеству можно отнести все токи, образующиеся при грозовой деятельности. Укажем некоторые их виды.

1) Токи молний – это заряды, циркулирующие в атмосфере при разрядах молний. Одновременно на всей земле действует около 1800 гроз, и во время каждой грозы ударяет в среднем 60 молний в час. Полный заряд, переносимый молниями всех типов, колеблется от 0,2 до 500 Кл и в среднем составляет около 35 Кл. Величина среднего тока молний достигает примерно - 20 Кл/км² в год. А полный заряд, переносимый вспышками молний всех типов, называется током грозовых разрядов, который составляет в среднем

2) Токи острий – это светящиеся разряды, образующиеся на электродах с малым радиусом кривизны (возвышенностях, проводах и остриях) при грозах, метелях и при напряженности электрического поля более 105 В/м. Продолжительность данного явления часто достигает нескольких часов. Исследования показали, что величина токов острий составляет несколько мкА и за значительный промежуток времени к поверхности земли переносится преимущественно отрицательный заряд. Причем составляющая токов острий в переносе отрицательного заряда больше, чем токов молний. При отрицательном заряде острия размер нитей, образующих корону, небольшой и составляет 2–3 см. Ток короны постоянно изменяется, пульсирует, потому как знак объемных зарядов, образующихся вокруг, и знак острия совпадают, что может привести к уменьшению поля и даже к затуханию короны, если объемный заряд не рассеивается в окружающее пространство.

При положительном заряде острия свечение распределяется почти равномерно. Корона в данном случае не «сидит» на острие, а находится на коротком светящемся столбце («стебелек короны»). Это связано с тем, что малоподвижные положительные ионы создают положительный объемный заряд вокруг острия, которое ослабляет поле вблизи него, а электронные

лавины развиваются от внешней границы короны к острию. Размеры нитей, которые образуют корону, в некоторых случаях достигают 15 см.

3) Ток осадков – это ток, переносимый гидрометеорами, которые приобрели заряд при падении сквозь облако и взаимодействии между собой.

На основании наблюдений были найдены некоторые закономерности:

4) Вертикальный ток – это ток вертикального направления, образующийся в атмосфере. Он возникает в двух вариациях. Первый – это конвективный ток, который возникает при конвекциях в атмосфере. Другой, вертикальный ток проводимости, который образуется при наличии в атмосфере вертикально направленного электрического поля. Он течет по направлению к земной поверхности.

Проводя скрупулёзные измерения в 1915-1928 годах вдали от загрязнителей в открытом океане, во время экспедиции исследовательского судна «Карнеги», исследователи получили четкий суточный цикл изменения напряженности электрического поля, не зависящий от географического местоположения наблюдателя. Это важное открытие породило на мысль о глобальном источнике суточного изменения поверхностного электрического поля. К концу 1920-х годов появились доказательства того, что суточное изменение напряженности по отношению к Универсальному Времени было неизменным для любых метеостанций. Впоследствии позже было открыт феномен Унитарной Вариации, который является, по большей части, одним из главных доказательств существования ГЭЦ.

Явление унитарной вариации заключается в том, что суточные изменения напряженности электрического поля E имеют вид волны с максимумом и минимумом. Величина изменения напряженности составляет порядка 20%. Эти данные изображены на рис. 1.2, они наблюдаются одновременно для всего земного шара.

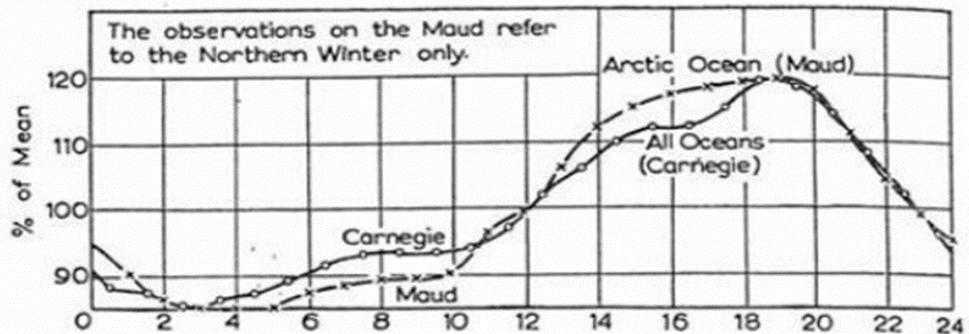


Рис. 1. 2 – Суточные изменения напряженности электрического поля E

Данный график демонстрирует изменения напряженности электрического поля атмосферы (кривая Карнеги). На графике очевидно, что минимум напряженности электрического поля наблюдается около 04.00UT, а максимум – около 19.00UT. Значение изменения напряженности совпадает с прежними данными теоретических построений и измерений на станциях.

Данные, полученные в ходе работы по измерению напряжённости электрического поля для различных зон земного шара отражены на рис. 1.3.

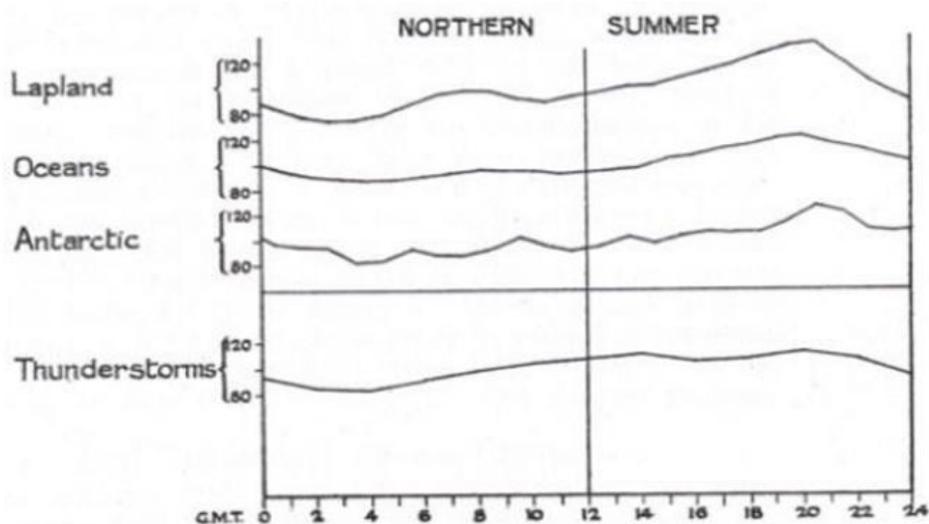


Рис. 1.3 – Изменение напряжённости ЭП для различных зон Земли.

При анализе графика можно заметить, что океанические области характеризуются меньшим изменением напряженности, чем в других регионах. Это наблюдение подкрепляется измерениями, проведенными на исследовательском судне «Карнеги». В полярных регионах так же наблюдается суточные изменения электрического поля с максимумами и минимумами в те же промежутки времени. Исходя из графика можно сделать вывод, что существует связь с суточными изменениями грозовой активности.

Стоит остановиться на этом вопросе и разобрать его подробнее. После создания глобальной сети метеорологических станций стало возможным сравнить суточные колебания напряженности электрического поля с суточным циклом глобальной грозовой активности. Самым первым учёным, исследовавшим связь вышеописанных величин, стал английский математик и метеоролог Франциск Джош Уиппл. В 1929 г. Он сравнил суточную вариацию площади грозы (рис. 1.4) и предположенные ранее идеи о типичном возникновении штормов в местное время и частоте океанических штормов с суточной вариацией напряженности поля для различных регионов.

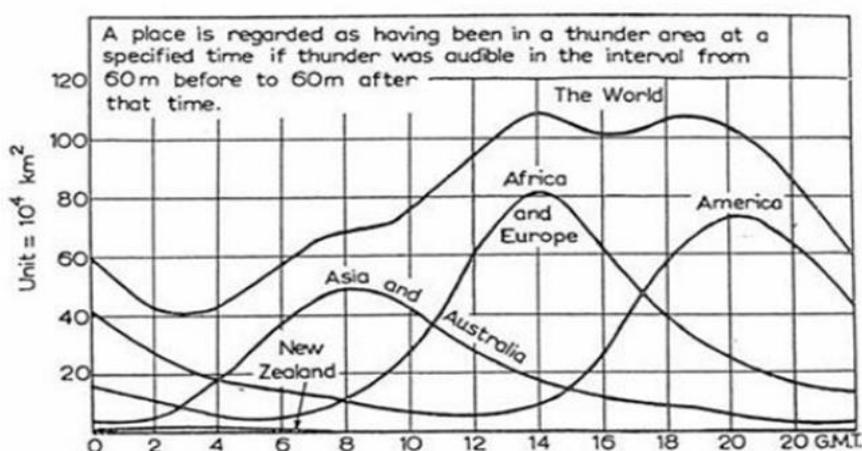


Рис. 1.4 – Суточная вариация площади грозы в различных частях света.

Между данными измерениями было достигнуто приемлемое согласование и, стоит отметить, что минимумы и максимумы обеих кривых происходили примерно в одно и то же время, что сильно поддерживало теорию Вильсона о ГЭЦ. Однако в этом исследовании не учитывались ливневые облака

и другие области «нарушенной» погоды из-за ожиданий, что грозы основной, но не единственный механизм питания глобальной атмосферно-электрической цепи. Дальнейшие исследования провели экстраполяцию линейного соответствия между напряженностью поля из кривой Карнеги и областью грозовой активности, в результате которого было обнаружено, что грозовая активность вносит существенный вклад в изменение напряженности электрического поля атмосферы, но не является единственным ее источником.

Синхронные изменения наблюдаются так же и в годовом ходе напряженности поля. В северном полушарии напряженность электрического поля имеет максимум в зимнее время (декабрь-февраль), а минимум в летнее (июнь-август). Амплитуда годовых колебаний растет от полярных и южных районов к средним широтам. В южном полушарии так же максимум наблюдается в период с декабря по февраль и минимум – с июня по август, но амплитуда изменений меньше, чем в северном полушарии. Делая выводы из этого, можно сказать, что годовой ход изменения напряженности электрического поля происходит одинаково на всей поверхности земли. Исходя из этого, объективно можно утверждать, что исследования, сделанные в течение дальнейших 100 лет с момента появления концепции Глобальной Атмосферной Электрической Цепи, продолжают поддерживать ее гипотезу. Можно предположить, что наибольшая неясность ситуации находится в численной связи между глобальной грозовой активностью и потенциалом ионосферы, а также в физических механизмах разделения зарядов и их переноса в верхние слои атмосферы, хотя более поздние открытия восходящих плазменных разрядов с вершин гроз (например, «Спрайтов»), возможно, прольют свет на истинное положение вещей. В ходе исследований было отмечено ослабление этого разряда, когда он проходит вдоль ионосферы, что дает некоторое дальнейшее представление о взаимодействиях, присутствующих в этой цепи. Хотя число качество исследований на данную тему с каждым годом растёт, для более уверенного доказательства теории

Глобальной Электрической Цепи требуется достаточно плотная сеть метеостанций и синхронный мониторинг базовых электрических характеристик атмосферы и грозовой активности с помощью радиозондов и других современных средств наблюдения.

1.4 УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ГЭЦ

Теперь рассмотрим некоторые формулы и уравнения, описывающие ГЭЦ.

Основные уравнения, описывающие глобальную токовую цепь, имеют следующий вид:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\rho \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1.5)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;

H – напряженность магнитного поля, А/м;

J – плотность электрического тока, А/м²;

ρ – плотность электрического заряда, Кл/м³;

ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, равная $8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$

В условиях $\omega \gg \omega_0$, $L \gg 2\pi\omega_0 L^2$ (T – характерный временной масштаб, L – характерный пространственный масштаб задачи) система уравнений (1.1–1.5) сводится к следующей системе:

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\operatorname{div} j \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} j = 0 \quad (1.8)$$

Система (1.6–1.8), в сущности, описывает все электрические процессы в нижних слоях атмосферы, за вычетом только быстропеременных процессов, протекающих при молниевых разрядах. Последнее уравнение для плотности электрического заряда является следствием уравнения для $\operatorname{rot} H$, если от него взять операцию div . Выражение для плотности электрического тока записывается в следующем виде:

$$j = j_0 + j_1 + j_2 + \sum_i j_i \quad (1.9)$$

где V – гидродинамическая скорость движения среды, м/с;

K – коэффициент турбулентной диффузии, м²/с;

j – плотность электрического тока, создаваемая i -м источником, А/м².

Последний член, входящий в выражение (9), описывает источники тока в атмосфере, в частности, грозы. Второй и третий члены существенны в пограничном слое атмосферы.

Если выполнено условие $T \gg \epsilon_0 / \lambda = \tau_\lambda$, то в этом случае током смещения $\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ можно пренебречь и система уравнений (1.6–1.8) превращается в стационарную:

$$\operatorname{div} j = 0 \quad (1.10)$$

$$\operatorname{div} j = 0 \quad (1.11)$$

$$\operatorname{div} j = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1.12)$$

Не маловажную роль в изучении электрических процессов в атмосфере играют ее электропроводящие свойства. Ионный состав атмосферы в нижнем слое весьма сложен. Имеется целый спектр ионов, которые представляют собой комплексы молекул, несущих заряд, равный элементарному заряду (заряд электрона e). Атмосферные ионы различаются химической природой входящих в них молекул, коэффициентом диффузии, подвижностью (b_{\pm}). Можно выделить примерно пять групп ионов в зависимости от их подвижности и радиуса:

- 1) Лёгкие (малые) ионы ($b_{\pm} \geq 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$, $r \leq 6,6 \cdot 10^{-16} \text{ м}$);
- 2) Легкие промежуточные ионы ($10^{-6} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В}) \leq b_{\pm} \leq 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$, $6,6 \cdot 10^{-16} \text{ м} \leq r \leq 8 \cdot 10^{-16} \text{ м}$);
- 3) Тяжелые (большие) промежуточные ионы ($10^{-7} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В}) \leq b_{\pm} \leq 10^{-6} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$, $8 \cdot 10^{-16} \text{ м} \leq r \leq 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ м}$);
- 4) Ионы Ланжевена ($2,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В}) \leq b_{\pm} \leq 10^{-7} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$, $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ м} \leq r \leq 5,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}$);
- 5) Ультратяжелые ионы ($b_{\pm} < 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$, $r > 5,7 \cdot 10^{-14} \text{ м}$).

Электропроводность атмосферы λ при известном ионном составе определяется выражением:

$$\lambda = \sum_i (\lambda_{i+} + \lambda_{i-}) = \lambda_+ + \lambda_- \quad (1.13)$$

где i – суммирование по группам ионов;

λ_+ , λ_- – полярные электропроводности.

В нынешних представлениях основной вклад в электропроводность нижних слоев атмосферы вносят легкие ионы. Электропроводность в этой части земной атмосферы образуется под воздействием радиоактивного излучения земной поверхности, радиоактивных примесей, содержащихся в

воздухе, космического излучения. По мере отдаления от поверхности земли она растёт и ее зависимость от высоты представлена в виде уравнения:

$$\lambda = \lambda_0 \exp\left[\frac{h}{6400}(\rho - \rho_0)\right] \quad (1.14)$$

где λ_0 – электропроводность вблизи поверхности Земли;

ρ_0 – радиус Земли, равный 6370000 м;

$h^{-1} = 6400$ м.

Представление (1.14) не исключительно. В некоторых случаях до высоты примерно 4000 м электропроводность λ может быть представлена в следующем виде:

$$\lambda = \lambda_0 \exp\left(\frac{\rho - \rho_0}{820}\right), 0 < (\rho - \rho_0) < 3600 \text{ м} \quad (1.15)$$

$$\lambda = \lambda_1 \exp\left(\frac{\rho - \rho_0}{4100}\right), 3600 < (\rho - \rho_0) < 17700 \text{ м} \quad (1.16)$$

$$\lambda = \lambda_2 \exp\left(\frac{\rho - \rho_0}{7000}\right), 17700 < (\rho - \rho_0) < 40000 \text{ м} \quad (1.17)$$

где λ_1 – электропроводность на высоте 3600 м;

λ_2 – электропроводность на высоте 17700 м.

Помимо высотных изменений λ в атмосфере наблюдаются широтные изменения, связанные с зависимостью интенсивности космических лучей от широты. Её значения на полюсе и экваторе отличаются друг от друга в 2 раза.

В этом случае для электропроводности вблизи земной поверхности имеет место следующее аппроксимационное представление:

$$\sigma_0(\Theta) = \sigma_0 \left\{ 1 + \frac{\Delta\sigma}{2} [1 + \sigma\sigma\sigma(\Theta - 30^\circ)] \right\}, 30^\circ < \Theta < 150^\circ \quad (1.18)$$

$$\sigma_0(\Theta) = \sigma_0(1 + \Delta\sigma), \Theta < 30^\circ, \Theta > 150^\circ \quad (1.19)$$

где $\Theta = \frac{\varphi}{2} - \bar{\varphi}$ в северном полушарии;

$\Theta = \frac{\varphi}{2} + \bar{\varphi}$ в южном полушарии;

$\bar{\varphi}$ – широта места

$\Delta F = 0, 4, 1$.

Экспоненциальный характер электропроводности нарушается в пограничном слое атмосферы до высоты 2000 м. Объясняется это тем, что в этом случае важную роль начинают играть гидродинамические турбулентные процессы, которые зависят от географического положения рассматриваемой области наземной поверхности и приводящие к изменению распределения электропроводности с высотой. В условиях сильного турбулентного перемешивания профиль электропроводности определяется коэффициентом турбулентной диффузии.

Гидродинамические турбулентные процессы и запыленность атмосферы приводят к тому, что электропроводность в пограничном слое мало меняется с высотой и может считаться постоянной. Выше пограничного слоя она возрастает согласно по экспоненциальному закону.

Роль электронной проводимости в нижних слоях атмосферы мала, поскольку электроны рекомбинируют с нейтральными молекулами за время 10^{-2} – 10^{-7} с, образуя отрицательные ионы. Однако с увеличением высоты значимость электронной проводимости увеличивается.

ГЛАВА 2. КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ – ЧАСТЬ ГЭЦ

Открытие космических лучей произошло в 1912 г. австрийским физиком В. Ф. Гессом, когда выяснилось, что проникающее излучение высокой энергии происходит извне – из пространства, окружающего Землю. Исследуя этот феномен в течение многих лет, учёные пришли к выводу, что потоки энергии космических лучей почти полностью задерживаются в атмосфере, ионизируют её и обеспечивают работу ГЭЦ.

2.1 ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ГЭЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Из космического пространства на верхнюю границу атмосферу Земли непрерывно падает изотропный поток галактических космических лучей. Их поток зависит от геомагнитной широты, солнечной активности и изменяется с течением времени. Проходя через атмосферу, КЛ взаимодействуют преимущественно с молекулами азота N_2 и молекулами кислорода O_2 , которые являются основными газовыми составляющими (~73% и ~21% соответственно). Свою энергию КЛ расходуют на возбуждение, диссоциацию и ионизацию молекул (атомов) воздуха, а также на ядерные взаимодействия с атомами.

КЛ являются главным глобальным ионизатором атмосферы в диапазоне высот от поверхности земли до ~ 50 км, где максимальная концентрация ионов наблюдается на высотах 15 –17 км. Свойство КЛ ионизировать воздух в страто - и тропосфере является определяющим при протекании токов в грозových зонах.

Космические лучи инициируют зарождение грозových облаков, а частицы с энергией $E > 10^{15}$ эВ (ШАЛ) образуют ионизированные следы в атмосфере, по которым в зонах «плохой погоды» распространяется молниевый разряд.

Каждые сутки небо прочерчивают 4 млн молний и около 50 ежесекундно. А над грозовыми фронтами в верхних слоях атмосферы, происходят разряды высоких энергий, которые бьют не в землю, а в ионосферу.

Самые короткоживущие высотные разряды – «эльфы» возникают в нижней ионосфере на высотах 80 –100 км. Возникнув в центре, свечение расширяется до 300 – 400 км, меньше чем за миллисекунду, а затем угасает. Рождаются эльфы через 300 микросекунд после сильной молнии, ударившей из грозового облака в землю. Ствол молнии «передающей антенной », от которой со скоростью света «стартует» мощная сферическая электромагнитная волна очень низкой частоты. За 300 микросекунд она добирается до высоты 100 км, где «возбуждает» красное свечение молекул азота.

«Голубые джеты» выглядят как голубой узкий перевернутый конус, «стартующий » с верхней границы грозового облака. Иногда джеты достигают высоты 40 км, скорость распространения их от 10 до 100 км/с. Их появление не всегда связано с разрядами молний. Кроме голубых джетов выделяют «голубые стартеры» (распространяются до высот 25 км) и «гигантские джеты» (распространяются до высот нижней ионосферы примерно 70 км). Гигантские джеты наблюдаются очень редко; к настоящему времени насчитывают не более 15 таких событий. Интерес физиков к гигантским джетам под стать их размерам, ведь эти разряды совершают “беспосадочный перелет ” из тропосферы прямо в ионосферу.

«Спрайты » - очень яркие объемные вспышки длительностью порядка миллисекунд, возникающие на высоте 70 - 90 км и спускающиеся вниз на 30 - 40 км. Их ширина достигает в верхней части десятки километров. Спрайты вспыхивают в мезосфере примерно через сотую долю секунды после разряда мощных молний «облако – земля», иногда на удалении несколько десятков километров по горизонтали от канала молнии. Красно-фиолетовый цвет спрайтов, как и эльфов, связан с атмосферным азотом. Частота появления спрайтов – порядка нескольких тысяч событий в сутки по всему земному шару.

Тонкая структура нижней части спрайтов характеризуется множеством светящихся каналов с поперечными размерами от десятков до сотен метров. Возникновение спрайтов связано с образованием высокого дипольного момента нескомпенсированного заряда, после особенно мощных молниевых разрядов облако-земля, обычно положительной полярности.

Потоки КЛ возмущают магнитосферу, вызывая видимые свечения (рис. 2.1). Особо ярким и длительно наблюдаемым результатом КИ является полярное сияние. Это свечение разреженного воздуха вследствие солнечных вспышек и усиления интенсивности КЛ, поступаемых в земную атмосферу. Оно наблюдается на высотах от 80— 100 км и чаще всего до 400 км. Иногда полярные сияния достигают больших высот: 1000 — 1100 км.

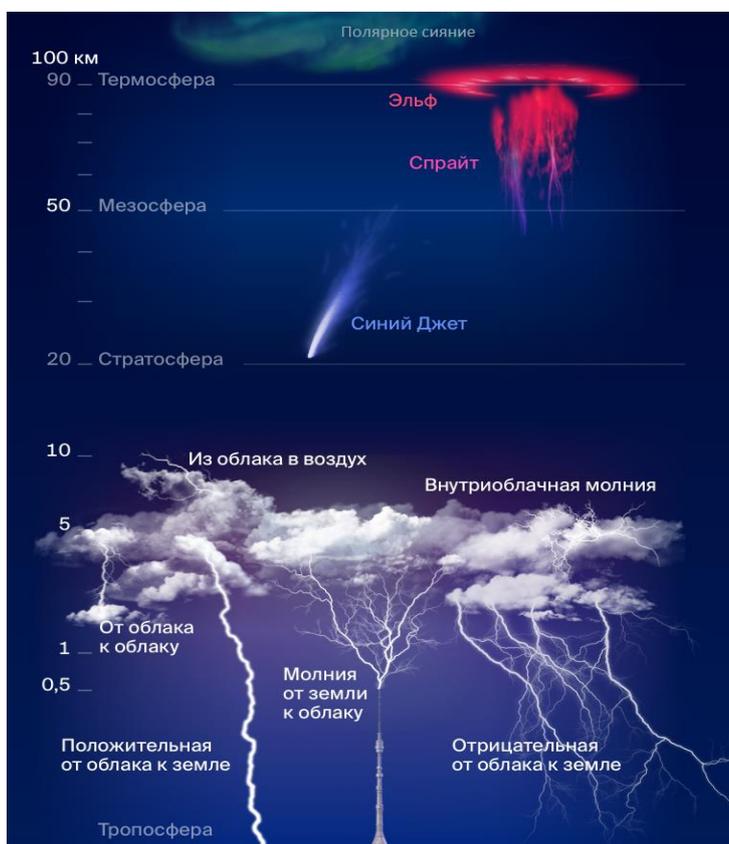


Рис. 2.1 – Электрические явления в атмосфере Земли.

Наблюдения поверхностного электрического поля над земным шаром в течение прошлого столетия показали, что электрическое поле начинает увеличиваться с минимума задолго до восхода солнца на земле. Для

объяснения наблюдаемого эффекта восхода солнца были выдвинуты различные теории. Однако ни одна из них не оказалась полностью удовлетворительной.

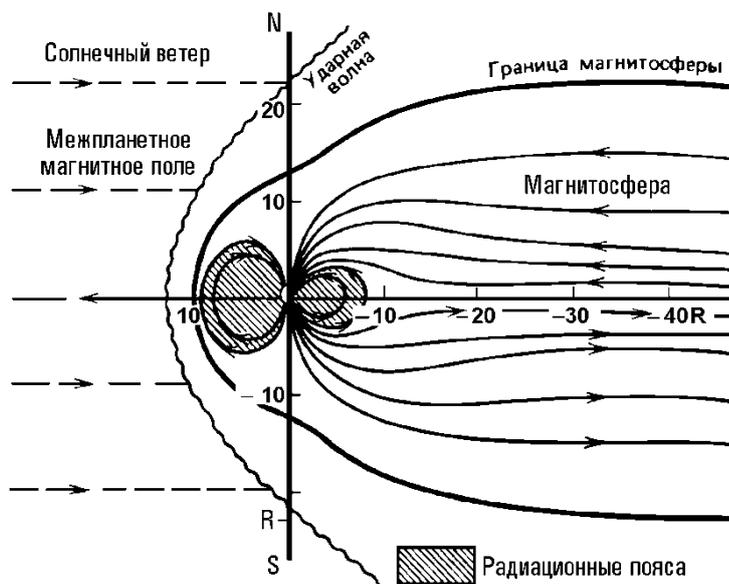
Далее для объяснения наблюдаемого эффекта восхода была использована альтернативная теория. Гравитационные волны генерируются в пограничном слое атмосферы в результате процесса микромасштабной фракционной конденсации, который приводит к возникновению мигрирующих вихрей с полусуточной периодичностью и стационарных по отношению к местному времени. Это полусуточное приливное колебание, которое приводит к полусуточному изменению давления. Низкое давление в часы перед восходом солнца приводит к сближению и восходящему потоку массы. Восходящий средний поток приводит к возникновению аэрозольного тока, который приводит к увеличению электрического поля приземной атмосферы. Таким образом, эффект восходящего солнца от электрического поля приземной атмосферы обусловлен ранним утренним минимумом приземного давления и возникающим в результате восходящим потоком аэрозоля.

2.2 МЕХАНИЗМ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЧАСТИЦ КЛ В АТМОСФЕРНЫЕ СЛОИ ЗЕМЛИ

2.2.1 СТРОЕНИЕ МАГНИТОСФЕРЫ

Космическое излучение, прежде чем приблизиться к земной поверхности и запустить механизмы воздействия на ГЭЦ, должна пройти защитный невидимый слой – магнитосферу Земли. Аналогично, как и ионосфера, магнитосфера относится к плазменным оболочкам Земли. Планета Земля представляет собой магнит в составе Солнечной системы, магнитные силовые линии которого выходят из южного магнитного полюса (65° ю.ш., 139° в.д.) и вливаются в область северного магнитного полюса (77° с.ш., 102° з.д.).

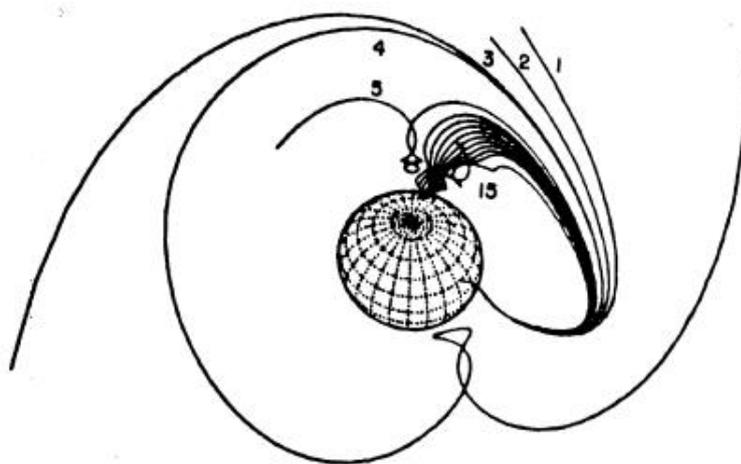
Рассмотрим схематическое изображение воздействия КЛ на магнитосферу на



примере солнечного ветра (рис. 2.2).

Рис. 2.2 – Воздействие КЛ на магнитосферу земли.

Дипольное магнитное поле планеты захватывает огромные потоки протонов и электронов и сосредотачивает их в радиационных поясах или, иначе, поясах Ван-Аллена. Механизм захвата частиц в геомагнитную ловушку можно иллюстрировать для случая, когда КЛ попадают в магнитосферу извне



(рис. 2.3).

Рис. 2.3 – Механизм захвата частиц в геомагнитную ловушку магнитосферы Земли.

Видно, что частицы высокой энергии (1) движутся по сравнительно простым орбитам. Из-за присутствия твёрдого тела Земли некоторые траектории заканчиваются (прерываются) на земной поверхности. С уменьшением энергии (жёсткости) частиц их орбиты становятся более сложными и образуют промежуточные петли. Если петли пересекают поверхность Земли, то их траектории также прерываются. При малых энергиях частицы имеют замкнутые траектории (15), т.е. оказываются захваченными в магнитосфере.

2.2.2 СТРОЕНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Гипотеза о существовании проводящего слоя в верхней атмосфере была высказана английским учёным Стюартом в 1878 г., а в 1920 г. Кеннели в США и Хевисайд в Англии предположили существование в высоких слоях атмосферы области с большой проводимостью. В 1923 г. советский ученый М. В. Шулейкин, изучая особенности распространения радиосигналов различных частот, сделал вывод о наличии в ионосфере не менее двух отражающих слоев. А в 1925 г. английские исследователи Эпплтом и Барнет, а также Брейт и Тьюв впервые экспериментально доказали существование областей, отражающих радиоволны и положили начало их систематическому изучению. С того времени уже более 60 лет ведется исследование этого природного феномена, называемого ныне ионосферой, играющего существенную роль в ряде геофизических явлений и при использовании радиоволн для практических целей.

Ионосфера – это сильно ионизированный космическими лучами слой атмосферы. Он не имеет чётких границ и, по мимо всего прочего, является частью других атмосферных слоёв.

Возрастание проводимости атмосферы с высотой, установленное прямыми измерениями до высоты в 30 км, продолжается и на больших

высотах. Причиной этому то, что на больших высотах вместе с КЛ начинают действовать значительно более мощные ионизаторы. К таким ионизаторам относятся ультрафиолетовое (с $\lambda < 0,1$ мкм) излучение Солнца, его корпускулярные излучения, метеоры и излучения звезд. При всём этом на высотах, где плотность атмосферы очень мала, электроны, образованные в процессе ионизации, могут длительное время существовать в свободном состоянии.

Ионосфера включает в себя атмосферные слои, простирающиеся от уровня 50-80 км до высоты около 400 км и характеризующиеся относительно высокой концентрацией положительных молекулярных и атомных ионов и свободных электронов. Положительные ионы и электроны вместе с нейтральными частицами образуют ионизированную плазму с большой электропроводностью, но квазинейтральную. Ионосфера делится на области с увеличенной ионной концентрацией с плавными переходами между ними. Это область D, от 60 до 110 км, где ночью ионизация практически исчезает, E - от 110 до 140 км, F₁ - от 140 до 220 км и F₂ - от 220 до 400 км. Нередко термин «ионосфера» распространяют на вышележащие слои до очень больших высот.

В областях D и E преобладают молекулярные ионы кислорода и азота, в области F - атомные ионы кислорода. Еще выше появляются ионы гелия и водорода (протоны). Высота и степень ионизации областей ионосферы меняется в суточном и годовом ходе, а также неперпериодичности в зависимости от солнечной активности.

Исследования демонстрируют, что ионосфера находится в состоянии непрерывного и сложного движения. В нижней ионосфере заряженные ионизированные частицы движутся вместе с незаряженными, и этот процесс получил название ионосферного ветра. На больших высотах движение ионов происходит независимо от движения незаряженных частиц и в большей мере обуславливается магнитным полем Земли – это так называемый ионосферный дрейф. Помимо этого, в ионосфере наблюдаются приливные явления.

Тесная связь состояния ионосферы с солнечной активностью выражается и в том, что с увеличением солнечной активности увеличивается и ионизация всей ионосферы, в связи с чем и наблюдаются регулярные изменения с 11-летним циклом.

Из всего вышесказанного очевидно то, насколько сложно строение ионосферы и происходящие в ней явления. Для исчерпывающего объяснения их нужны дальнейшие наблюдения. В последние несколько лет получены новые данные с помощью искусственных спутников Земли и геофизических ракет. Определения электронной концентрации, проводимые при этом методом измерения дисперсии радиоволн (регистрации разности фаз двух радиоволн с разными частотами) или методом измерения вращения плоскости поляризации радиоволн (эффект Фарадея), подтвердили, что в ионосфере отсутствуют резко очерченные слои. Имеют место лишь локальные максимумы при общем монотонном возрастании концентрации электронов до главного максимума — слоя F. Представление об ионосфере как о системе четко выраженных ионосферных слоях в настоящее время пересматривается.

2.2.3 ИОНИЗАЦИЯ И ПРОВОДИМОСТЬ АТМОСФЕРЫ

Потоки КЛ имеют самое большое влияние на ионизацию в атмосфере на высотах $h = 3 - 35$ км, как это показано в таблице ниже (таб. 2.1) Тем самым космические лучи определяют почти все электрические свойства атмосферы — от образования ионов до формирования гроз и возникновения молний. Атмосферное электричество играет важную роль в изменениях погоды и климата. Потоки космических лучей модулируются солнечной активностью.

Источник ионизации	Образование ионов, пар/с
Естественная радиоактивность ($h < 3$ км)	$< 10^{24}$
Галактические космические лучи (по всей атмосфере)	$\sim (10^{27} - 10^{28})$
СКЛ, выпадение частиц (спорадические явления)	$\sim (10^{26} - 10^{27})$
УФ- и рентгеновское излучения Солнца ($h > 50$ км)	$\sim 10^{28}$
Солнечный ветер (ионосфера)	$\sim 10^{26}$
Молнии (районы грозовой активности, $h < 10$ км)	$\sim (10^{27} - 10^{28})$

Таб. 2.1 – Энергетический спектр КЛ.

Наличие ионов в атмосфере определяет ее проводящую способность, или, иначе говоря, проводимость. Ионы движутся в электрическом поле напряженностью E со скоростью kE , и так как каждый ион имеет заряд, равный e , то при концентрации ионов, равной n м⁻³, через каждый 1 м² поверхности, перпендикулярной к направлению поля E , в единицу времени будет переноситься в одну сторону заряд, равный $i_+ = n_+ k_+ eE$, и в обратную сторону заряд $i_- = n_- k_- eE$.

Сумма их, равная

$$i = i_+ + i_- = (n_+ k_+ + n_- k_-)eE \quad (2.1)$$

дает плотность тока проводимости, при этом произведения:

$$\lambda_+ = n_+ k_+ e \quad \text{и} \quad \lambda_- = n_- k_- e \quad (2.2)$$

представляют собой полярные проводимости, а сумма полярных проводимостей дает суммарную проводимость:

$$\lambda = \lambda_+ + \lambda_- \quad (2.3)$$

При наличии в атмосфере ионов и других заряженных частиц величина суммарного заряда каждого знака на всех частицах, содержащихся в некотором объеме, может оказаться неодинаковой. Из этого следует, что можно найти заряд данного объема и плотность объемного заряда ρ или, иначе

сказать, величину избыточного заряда, отнесенного к единице объема (см^3 или м^3). Объемные заряды играют очень большую роль во всех явлениях ГЭЦ.

Проводимость атмосферы зависит не только от числа ионов, но также в значительно большей мере от их подвижности. Поэтому периодические изменения проводимости атмосферы примерно сходны с изменением числа легких ионов, но показатели не абсолютно идентичны. В годовом ходе, сильно зависящего от местных условий, в большинстве пунктов средних широт проводимость атмосферы в теплую половину года больше, чем в холодную. Если говорить о суточном ходе проводимости, то, например, в большинстве мест средних широт Северного полушария наблюдается суточный ход, характеризуемый максимумом в ранние утренние часы (который ярко выражен летом) и минимумом в вечерние часы. Этой закономерностью также можно охарактеризовать со схожим типом климата.

2.3 АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ

Космические лучи занимают огромный диапазон энергий, охватывающий 15 порядков величины (от $\sim 10^6$ до $\sim 10^{21}$ эВ). Их генераторами могут выступать любые масштабные процессы и явления во Вселенной – от взрывов сверхновых до образования пульсаров. Солнце также является источником космических лучей, причём потоки СКЛ после мощных солнечных вспышек могут достигать очень больших значений. Далее перечислим различные источники КЛ и рассмотрим их более подробно.

2.3.1. СОСТАВ МЕЖПЛАНЕТНОГО ВЕЩЕСТВА

По природе своего происхождения космическое излучение подразделяется на 2 типа.

1) Галактические космические лучи - космические частицы, приходящие на Землю из недр нашей Галактики. В их состав не входят частицы, генерируемые Солнцем.

Поток ГКЛ, бомбардирующих Землю, примерно изотропен и постоянен во времени и составляет 1 частица /см² сек (до входа в земную атмосферу). Плотность энергии галактических космических лучей 1 эВ/см³, что сравнимо с суммарной энергией электромагнитного излучения звезд, теплового движения межзвездного газа и галактического магнитного поля. Исходя из вышесказанного, космические лучи – важный компонент Галактики.

Состав ГКЛ:

- 1) Ядерная компонента - 93% протонов, 6.5% ядер гелия, <1% более тяжелых ядер (т.е. отвечает распространенности ядер во Вселенной).
- 2) Электроны. Их число 1% от числа ядер.
- 3) Позитроны. Их число 10% от числа электронов.
- 4) Антиадроны составляют меньше 1%.

Энергии галактических космических лучей охватывают огромный диапазон – не менее 15 порядков (10⁶-10²¹ эВ). Их поток для частиц с E>10⁹ эВ быстро уменьшается с ростом энергии.

Есть веские основания полагать, что космические лучи генерируются, главным образом, вспышками сверхновых (другие источники космических лучей – пульсары, радиогалактики, квазары). В нашей Галактике взрывы сверхновых происходят в среднем не реже одного раза в 100 лет. Легко подсчитать, что для поддержания наблюдаемой плотности энергии космических лучей (1 эВ/см³) достаточно им передавать всего несколько процентов мощности взрыва. Выбрасываемые при вспышках сверхновых протоны, более тяжелые ядра, электроны и позитроны далее ускоряются в специфических астрофизических процессах, приобретая энергетические характеристики, присущие космическим лучам.

Реликтовым излучением называют фотонный газ, равномерно заполняющий Вселенную с приблизительной плотностью 400 частиц на кубический сантиметр. Существование этого излучения было предсказано в 1948 году Г.А. Гамовым и его учениками Р. Альфером и Р. Херманом на основе разработанной ими модели горячего Большого взрыва. При столкновении ультрарелятивистских электронов КЛ с фотонами Микроволнового Фонового Излучения происходит перераспределение энергии и импульса. Протоны и ядра сверхвысоких энергий также подвержены воздействию фотонов МФИ: при столкновении с ними ядра расщепляются, а соударения с протонами приводят к появлению новых частиц. Именно с этими процессами связывают практическое отсутствие в космических лучах частиц с энергией больше 10^{20} эВ, а также малое количество тяжёлых ядер.

В составе космических лучей практически нет метagalактических лучей, т.е. лучей, попавших в нашу Галактику извне. Все наблюдаемые свойства КЛ можно объяснить тем, что они образуются, накапливаются и долгое время удерживаются в нашей Галактике, медленно вытекая в межгалактическое пространство. Если бы космические частицы двигались прямолинейно, они вышли бы за пределы Галактики через несколько тысяч лет после своего возникновения. Столь быстрая утечка привела бы к невозможным потерям и резкому снижению интенсивности космических лучей.

В действительности наличие межзвездного магнитного поля с сильно запутанной конфигурацией силовых линий заставляет заряженные частицы двигаться по сложным траекториям (это движение напоминает диффузию молекул), увеличивая время пребывания этих частиц в Галактике в тысячи раз. Возраст основной массы частиц космических лучей оценивают в десятки миллионов лет. Космические частицы сверхвысоких энергий отклоняются галактическим магнитным полем слабо и сравнительно быстро покидают Галактику.

2) Солнечные космические лучи - космические частицы, генерируемые Солнцем.

Заряженные частицы, испускаемые Солнцем, так называемые солнечные космические лучи – весьма важный компонент космического излучения, бомбардирующего Землю. Эти частицы ускоряются до высоких энергий в верхней части атмосферы Солнца во время солнечных вспышек. Солнечные вспышки подвержены определенным временным циклам. Самые мощные повторяются с периодом 11 лет, менее мощные – с периодом 27 дней. Мощные солнечные вспышки могут увеличить поток космических лучей, падающих на Землю со стороны Солнца, в 10^6 раз по сравнению с галактическим.

В солнечных космических лучах больше протонов (до 98-99% всех ядер) и соответственно меньше ядер гелия (1.5%). В них практически нет других компонентов. Энергии частиц СКЛ меняются в интервале 10^5 - 10^{11} эВ.

Из-за высокой температуры и небольшого температурного градиента по высоте солнечная корона не находится в гидростатическом равновесии, а непрерывно расширяется в межпланетное пространство. Образующееся при этом истечение корональной плазмы известно как солнечный ветер. По причине очень высокой электрической проводимости корональной плазмы теплопроводность и истечение вещества определяются магнитным полем короны. В районах, где магнитные силовые линии вытягиваются высоко в корону (например, над так называемыми корональными дырами), корональное расширение резко усилено.

Скорость расширения очень мала во внутренней короне, но быстро возрастает с высотой. На расстоянии критического радиуса $E_{\text{тепл}}$ становится сравнимой с $E_{\text{к}}$ расширяющейся плазмы. В этой критической точке скорость расширения близка к скорости звука в плазме, так называемой звуковой точкой. На больших расстояниях скорость расширений возрастает еще больше, и солнечный ветер становится сверхзвуковым.

Непосредственные измерения космическими аппаратами подтвердили обоснованность концепции солнечного ветра. В нижеприведённой таблице 2.2 приведены типичные значения основных параметров солнечного ветра, полученные в околоземном пространстве.

Параметр	Средняя величина	Медленный солнечный ветер	Быстрый солнечный ветер
Плотность n , см ⁻³	8,7	11,9	3,9
Скорость u , км/с	468	327	702
Поток ni , см ⁻² с ⁻¹	$3,8 \cdot 10^8$	$3,9 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^8$
Протоны, T_p , К	$7 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^5$
Электроны, T_e , К	$1,4 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
Отношение T_e/T_p	1,9	4,4	0,45

Таб. 2.2 – Параметры солнечного ветра в околоземном пространстве.

Бесструктурное расширение короны, описываемое в большинстве моделей солнечного ветра, наблюдается редко. Более того, солнечный ветер испытывает вариации с характерным временем в несколько дней, сравнимым с основным временным масштабом общего расширения. Главным элементом солнечного ветра является высокоскоростной поток в том смысле, что солнечный ветер, наблюдаемый вблизи Земли, часто может рассматриваться как последовательность таких потоков. В потоке скорость истечения возрастает от минимальных до максимальных значений приблизительно за два дня. Последующее уменьшение скорости происходит более плавно, но стоит отметить, что иногда наблюдаются потоки, сохраняющие высокую скорость в течение нескольких дней, особенно в фазе спада солнечного цикла. За этими максимумами следуют очень низкие значения (район разрежения), сохраняющиеся в потоке в течение нескольких дней. Стоит отметить, что вышеуказанное описание потока справедливо только для расстояний от Солнца, близких к 1 а.е., т.е. непосредственно около Земли.

Движение потоков плазмы солнечного ветра с различными скоростями истечения подвержено сильному влиянию Солнца.

Высокоскоростной поток, изогнутый по спирали вращением Солнца, будет догонять движущиеся медленнее окружающие потоки солнечного ветра и сталкиваться с ними. Высокая электрическая проводимость намагниченной плазмы препятствует взаимопроникновению различных плазменных образований, вследствие чего окружающая быстрый поток плазма с меньшей скоростью истечения сжимается и отклоняется от первоначального направления, двигаясь параллельно границе раздела. Подобным же образом быстро движущаяся плазма будет замедлена и сжата на своем переднем крае. По причине того, что граница раздела между двумя плазменными областями — область взаимодействия — распространяется в межпланетном пространстве по направлению от Солнца; развивается система ударных волн, ограничивающих область взаимодействия: головная ударная волна, движущаяся от Солнца относительно границы раздела, и соответствующая обратная ударная волна, движущаяся к Солнцу. Большая часть массы, связанной с потоком, заключена в узком слое, ограниченном головной и обратной ударными волнами (рис. 2.4). Предполагается, что такие слои оказывают сильное влияние на распространение галактических космических лучей.

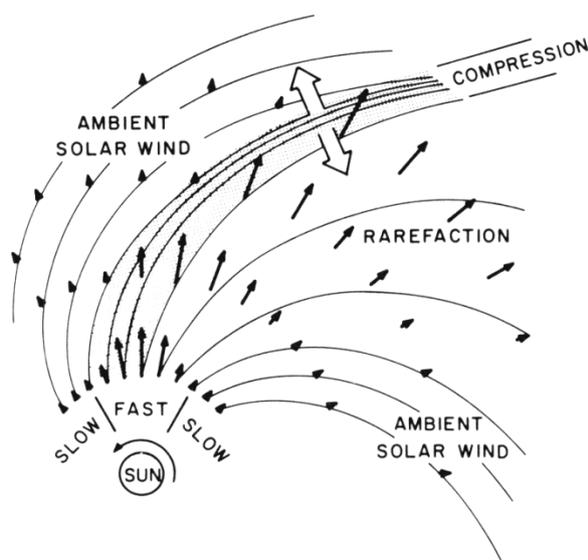


Рис. 2.4 – Ударные волны потоков плазмы Солнца.

Все приведенные выше характеристики космических лучей относятся к космическим частицам до входа в атмосферу Земли, т.е. к, так называемому, первичному космическому излучению. В результате взаимодействия с ядрами атмосферы (главным образом, кислородом и азотом) высокоэнергичные частицы первичных космических лучей (прежде всего протоны) создают большое число вторичных частиц – адронов (пионов, протонов, нейтронов, антинуклонов и т.д.), лептонов (мюонов, электронов, позитронов, нейтрино) и фотонов. Развивается сложный многоступенчатый каскадный процесс – Широкие Атмосферные Ливни или ШАЛ (рис. 2.5)

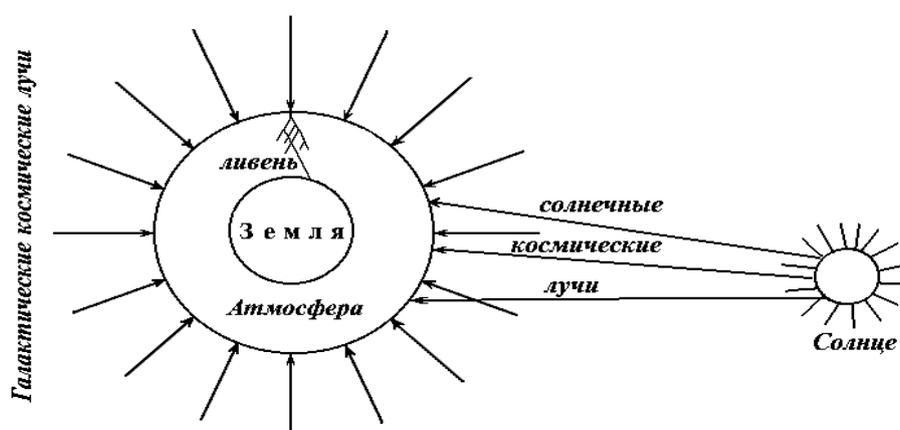


Рис. 2.5 – Схема образования ШАЛ.

2.3.2 ШАЛ

Толща межзвездного вещества, пройденного частицами первичного космического излучения равняется приблизительно 5 г*см^{-2} . Из-за ядерных реакций в этом межзвездном веществе генерируются потоки вторичных ядер, позитронов, электронов и γ -квантов. Количество вещества, на котором адрон может испытать в среднем одно ядерное взаимодействие, определяется пробегом в $\sim 100 \text{ г*см}^{-2}$. Первые взаимодействия первичной частицы с ядрами атомов в атмосфере происходят на высоте 10–15 км.

Число вторичных частиц в ШАЛ сверхвысоких энергий в зависимости от энергии достигает $10^7 - 10^{11}$, при этом почти все они находятся в пределах

2–3 км от оси ливня. Можно считать, что ШАЛ имеет примерно осевую симметрию, а частицы распределены в поперечном направлении с плотностью, описываемой убывающей с расстоянием от оси функцией пространственного распределения. Ядерная компонента ШАЛ сосредоточена в пределах нескольких метров от оси. Поэтому она не регистрируется на установках с широко разнесенными детекторами. Энергия электромагнитной компоненты постоянно подпитывается распадами вновь генерированных π^0 -мезонов, поэтому сопоставима с энергией всего ливня. На нее приходится $\sim 80 - 90\%$ энергии ШАЛ. Электроны, позитроны и γ -кванты быстро поглощаются веществом, поэтому для наклонных ливней с зенитными углами $\theta > 60^\circ$ они практически не достигают поверхности. Максимум рождения мюонов в вертикальных ШАЛ находится на высоте около 5 км. Их число составляет несколько процентов от числа всех частиц ливня. Мюонная компонента поглощается слабо и преобладает на больших расстояниях от оси ливня и в наклонных ШАЛ с зенитными углами $\theta > 60^\circ$. Энергия мюонной компоненты составляет несколько процентов от полной энергии ШАЛ.

Выше мы уже упоминали о том, что ШАЛ образуют ионизированные следы в атмосфере, по которым в грозовых зонах распространяется молниевый разряд. Заряженные частицы первичного и вторичного излучений, проходя через атмосферу, производят так называемую колонную ионизацию воздуха, которая наблюдается в следах этих частиц. Образованные частицей электроны и ионы внутри следа распределены радиально, уменьшаясь в концентрации от максимума в центре наружу. Вследствие диффузии след частицы со временем разрастается в ширину. В течение первых 100 мкс с момента прохождения радиус следа порядка $2 \cdot 10^{-3}$ см.

Длину ионизированного следа, оставляемого в воздухе высокоэнергичной частицей, при нормальном давлении можно рассчитать из соотношения

$$L = \varepsilon_0 / (2,3 \text{ кэВ} * \text{см}^{-1}),$$

(2.3)

а на высоте 1 км, где давление ниже, из соотношения

$$L = \varepsilon_0 / (2 \text{ кэВ} * \text{см}^{-1}).$$

(2.4)

На высоте 1 км частицы с энергиями 1, 10 и 40 МэВ оставляют в воздухе ионизированные следы длиной 5, 50 и 200 м. Электрическое поле грозового облака на длину следов практически не влияет. Это связано с тем, что в процессе движения заряженная частица практически всю накопленную энергию теряет при столкновении.

Очевидно, что количество ионизированных следов, появившихся в грозовом облаке велико. Однако если ближайшие каналы, находящиеся на расстоянии 5 м друг от друга, появляются в промежуток времени 50 мкс, то возникает «пробой» этих каналов.

В связи с тем, что вновь подключённый ионизированный канал становится электропроводящим, его потенциал принимает значение потенциала проводящей системы ШАЛ, равного $\sim V/2$. Далее происходит новый пробой воздуха между этим подключённым каналом и вновь образуемым ионизированным следом от другой высокоэнергичной частицы. Процесс подключения новых ионизированных следов продолжается до тех пор, пока проводящий канал, движущийся от облака, не достигнет проводящей поверхности земли и не завершит формирование ступенчатого лидера. Он проходит через систему следов, обладающую минимальным сопротивлением. Далее по проводящему каналу проходит так называемый возвратный удар. Во время этого удара электроны уходят из разветвлённой проводящей системы облака и уменьшают имеющееся там электрическое поле до $\sim 20 \text{ В/м}$, при котором разряд гаснет. Тем самым они производят нейтрализацию отрицательного избыточного объемного заряда, находящегося в облаке. Так происходит в случае нисходящей молнии, которая переносит отрицательный

заряд из облака на поверхность земли. В случае восходящей молнии электроны уходят с поверхности земли в облако и производят в нем нейтрализацию положительного объемного заряда.

Проходящий по следам космических лучей лидер имеет ступенчатую форму, т.к. он составлен из следов различной длины. Скорость распространения разряда вдоль лидера различна. Она максимальна в ступени (или в следе частицы) и близка к скорости света. Поэтому ступень длиной в десятки и сотни метров высвечивается за время менее 1 мкс. В то же время в промежутках между ступенями она порядка 10^7 см/с. При такой скорости промежуток воздуха длиной 5 м пробивается за время ~ 50 мкс, что соответствует характерному наблюдаемому значению так называемой паузы между ступенями лидера. Во время пробоя канал светится значительно слабее, чем в ступени. Время прохождения лидером промежутка между облаком и землей в основном определяется временем пробоя промежутков между ступенями и составляет единицы миллисекунд. В отличие от лидера возвратный удар распространяется с большей скоростью, характерная величина которой $\sim 5 \cdot 10^7$ м/с.

После возвратного удара заканчивается первый разрядный импульс молниевой вспышки. Далее происходит остывание разрядного канала. Если за время < 100 мс к этому каналу подключается система проводящих каналов нового ШАЛ, появившегося в облаке, то через него проходит второй разрядный импульс. Этому разряду предшествует так называемый стреловидный лидер, который проходит через систему проводящих каналов ШАЛ и неостывший канал предшествующего импульса. Число разрядных импульсов во вспышке молнии определяется числом ШАЛ, подключаемых к неостывшему разрядному каналу первого импульса, а также величиной заряда, находящегося в облаке. Проследим этот процесс на примере истории разряда ниже (рис. 2.6).



Рис. 2.6 – Наглядный пример молниевых разряда «облако -земля».

Кроме молний «облако -земля» существуют молнии внутриоблачные (их большинство) и молнии «облако-облако». Внутриоблачные молнии переносят заряды из одной части облака в другую по проводящим следам ШАЛ (значительно реже двух ШАЛ, одновременно попадающих в облако). Аналогичные процессы происходят при молниевых разрядах «облако -облако». Однако стоит заметить, что появление молний без ШАЛ невозможно.

Частицы КЛ с энергиями меньше 10^{13} эВ изучаются непосредственно с помощью ионизационных калориметров и другой аппаратуры, установленной на атмосферных аэростатах и космических аппаратах. КЛ с энергией больше 10^{14} эВ изучаются с помощью регистрации ШАЛ. Многочисленные эксперименты позволили установить спектр первичного космического

излучения сверхвысоких энергий. Он характеризуется резким уменьшением интенсивности с ростом энергии. Зависимость интенсивности J частиц ПКИ от энергии частиц E описывается приближенно степенным законом:

$$J(E) \approx C \cdot E^{-\gamma}, \quad (2.4)$$

где C – константа,

γ – показатель энергетического спектра частиц ПКИ.

До энергии 10^{15} эВ показатель $\gamma \approx 2,7$. При $(1-3) \cdot 10^{15}$ эВ происходит излом спектра, называемый коленом. Он был впервые обнаружен под руководством С.Н. Вернова и Г.Б. Христиансена в 1958 г. на установке ШАЛ МГУ. В интервале энергий $10^{15}-10^{18}$ эВ показатель $\gamma \approx 3,1$. Далее происходит излом, называемый лодыжкой, и при энергиях больше 10^{18} эВ показатель $\gamma \approx 2,7$. В целом, энергия изменяется на ~ 11 порядков, а интенсивность – на ~ 30 порядков. Особенность КЛ с энергией $\sim 10^{20}$ эВ в том, что они практически не отклоняются в магнитных полях галактик. Направление их прихода должно указывать прямо на источники, но крайне малая интенсивность не позволяет получить достаточную статистику в современных экспериментах. Следует отметить некоторое систематическое расхождение между данными, полученными на различных установках, которое вызвано разными методами регистрации ШАЛ и оценок их энергии. На диаграмме (рис.2.7) приведен энергетический спектр частиц ПКИ в области энергий $E > 10^{17,5}$ эВ, полученный в экспериментах РАО, ТА, ЯКУШАЛ.

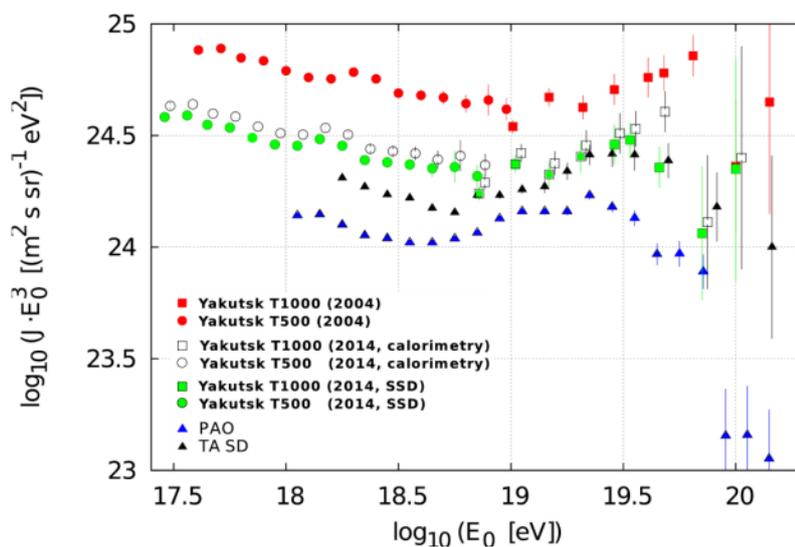


Рис. 2.7 – Спектр высокоэнергичных частиц ПККИ в экспериментах РАО, ТА и ЯКУШАЛ.

Регистрация ШАЛ может производиться разными методами на уровне наблюдения. Измеряются сигналы от частиц ливня в поверхностных детекторах разного типа, плотности потоков излучения Вавилова-Черенкова и флуоресцентного света и напряженность электромагнитного поля радиоизлучения. Заряженные частицы могут регистрироваться с помощью счетчиков Гейгера. На современных установках используются сцинтилляционные детекторы, в которых ионизационные потери энергии частиц преобразуются в свечение, регистрируемое фотоэлектронными умножителями. Частицы ливня движутся почти со скоростью света, быстрее скорости электромагнитных волн в воздухе и любом другом встречаемом веществе, поэтому возникает ИВЧ. Его измеряют в наземных детекторах ИВЧ. По полному числу черенковских фотонов можно оценить энергию ШАЛ. Частицы ливня, сталкиваясь с молекулами воздуха, возбуждают их. Этот процесс приводит к флуоресцентному свечению при прохождении частицами ливня атмосферы. В отличие от черенковского света, сосредоточенного в узком конусе вокруг оси с углом $\sim 30^\circ$, флуоресцентный свет излучается изотропно. Полный поток флуоресцентного света позволяет наиболее точно оценивать энергию ШАЛ. Регистрация черенковского и флуоресцентного света возможна

только в безоблачные и безлунные ночи. Радиоизлучение возникает по двум причинам. В потоке частиц ШАЛ преобладает отрицательный заряд из-за эффекта Комптона и аннигиляции позитронов, который вызывает поляризацию среды и ИВЧ. Позитроны и электроны отклоняются в противоположных направлениях в магнитном поле Земли, образуют диполь, движение которого вызывает радиоизлучение Кана-Лерша. Регистрация радиоизлучения ШАЛ осложняется его малой интенсивностью и радиопомехами.

ЯКУШАЛ работает с 1971 г. В ее состав входят наземные детекторы ИВЧ, сцинтилляционные наземные и подземные детекторы. Площадь изменялась со временем, сейчас она составляет около 8 км². Энергия ШАЛ оценивается по сигналам в наземных сцинтилляционных детекторах, нормированным по черенковскому свету. Энергия E_v вертикальных ШАЛ оценивается по сигналу $s(600, 0^\circ)$ в сцинтилляционных детекторах, расположенных на расстоянии 600 м от оси вертикального ливня:

$$\square_v = (4.8 \pm 1.6) \times 10^{17} \cdot (\square(600, 0^\circ))^{1.0 \pm 0.02} . \quad (2.5)$$

Энергия E_n наклонных ШАЛ с зенитным углом θ оценивается следующим образом. Сначала по методу сечения спектров плотностей сигналов линиями равной интенсивности определяется пробег поглощения λ_0 . Затем величина сигнала $s(600, \theta)$ в наклонном ливне пересчитывается к значению сигнала для вертикального ливня:

$$\square(600, 0^\circ) = \square(600, \theta) \times \exp((\sec\theta - 1)\square_0\lambda_0) , \quad (2.6)$$

где X_0 – толщина атмосферы,

$$\lambda_0 = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \cdot \log_{10}(s(600, 0^\circ)) \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} .$$

По пересчитанному сигналу энергия наклонного ливня оценивается по формуле (2.5). Этот метод приводит к систематическому завышению интенсивности спектра частиц ПКИ, полученного на ЯКУШАЛ, по отношению

к данным ТА и РАО. Другая неточность метода оценки энергии ливней на ЯКУШАЛ заключена в том, что под сигналом $s(600, \theta)$ подразумевалась плотность заряженных частиц на расстоянии 600 м от оси ШАЛ. В 2004 г. впервые были опубликованы результаты расчетов таблиц сигналов от основных типов частиц ШАЛ для оценки энергии ливней, зарегистрированных на ЯКУШАЛ. Рассчитанные с использованием этих таблиц оценки энергии ШАЛ оказались меньше якутских в 1,6 раза. Это впервые позволило согласовать энергетический спектр частиц ПКИ с мировыми данными.

Установка ТА расположена в штате Юта, США. Она состоит из 507 наземных сцинтилляционных детекторов и 38 флуоресцентных телескопов. Энергия ШАЛ оценивается по сигналам в наземных детекторах и интенсивности флуоресцентного света, измеренного телескопами. Сигналы в наземных детекторах моделируются с помощью пакета GEANT4. Развитие ШАЛ в атмосфере моделируется с помощью пакета CORSIKA. Для первой оценки энергии используется таблица зависимости средних сигналов $s(800)$ в наземных детекторах, расположенных на расстоянии 800 м от оси ливня, от типа первичной частицы, ее энергии и зенитного угла. Между оценкой энергии по наземным детекторам и флуоресцентному свету имеется систематическое расхождение, поэтому окончательную оценку энергии по наземным детекторам $E_{нд}$ нормируют по флуоресцентному свету простым делением на 1,27:

$$\square = \square_{нд} / 1,27. \quad (2.7)$$

Установка РАО расположена вблизи города Маларгуэ, Аргентина. В 2005 г. были опубликованы первые результаты на основе данных более 100 наземных детекторов. Установка РАО состоит из более 1600 наземных детекторов, расположенных на расстоянии 1500 м друг от друга, и 24 флуоресцентных телескопов. Сигналы $s(1000, \theta)$ в детекторах, расположенных на расстоянии 1000 м от оси ливня, от наклонных ШАЛ с зенитным углом θ пересчитываются в сигналы от ШАЛ с зенитным углом 38° .

Энергия E ШАЛ оценивается по сигналам в детекторах от наклонных ливней с зенитным углом 38° с учетом калибровки по флуоресцентному свету:

$$\square = (1,68 \pm 0,05) \times 10^{17} \cdot (\square(1000, 38^\circ))^{1,035 \pm 0,009} .$$

(2.8)

ГЛАВА 3. РОЛЬ КЛ В ПРОТЕКАНИИ ТОКОВ В ГЭЦ

Чуть менее 30 лет назад М.И. Пудовкин и О.М. Распопов предложили общую, довольно сложную схему возможного влияния космически лучей галактического и солнечного происхождения на тропосферу (рис.3.1). При всей условности этой схемы, из неё можно отметить, что основное (энергетическое) воздействие на земную атмосферу Солнце оказывает своим электромагнитным излучением (95%), тогда как на остальные воздействия остаётся не более 5%. При этом ГКЛ и СКЛ выглядят как «боковая ветвь» этого влияния. Вместе с тем, уже на уровне средней и нижней атмосферы авторы допускают прямые физические и химические взаимодействия энергичных солнечных частиц (протонов) и ГКЛ с частицами атмосферы. В нижней атмосфере как раз и вступает в действие, по-видимому, основной фактор, связанный с космическими лучами, а именно – появление свободных зарядов в ионизированном воздухе. Свободные заряды (особенно отрицательные ионы) могут служить ядрами конденсации водяного пара, что способствует образованию облаков и, в конечном счёте, приводит к изменению прозрачности атмосферы. Иными словами, как отмечено на схеме, атмосфера становится «серым фильтром» для электромагнитного излучения Солнца. Все эти процессы развиваются на фоне вариаций уровня солнечной активности (включая изменения мощности солнечного ветра), которая определяет частоту событий и потоки СКЛ, а также модулирует интенсивность ГКЛ (например, в ходе 11-летнего цикла).

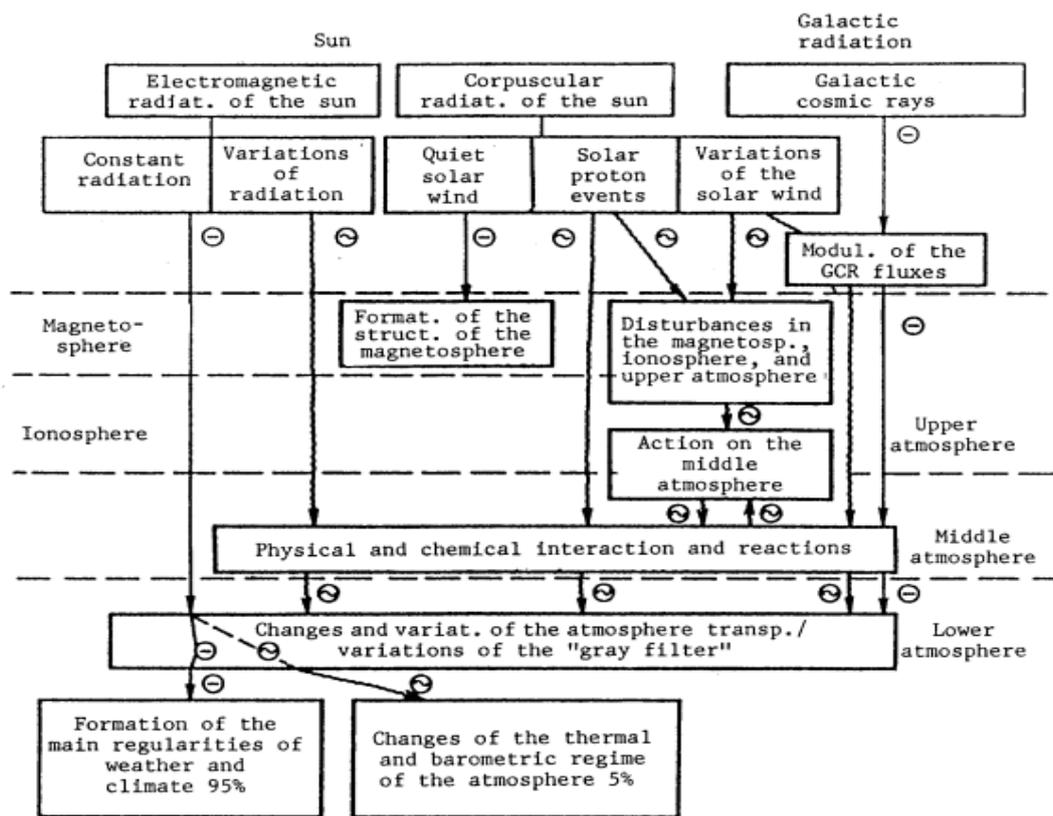


Рис.3.1 – Модель влияния СКЛ и ГКЛ на тропосферу.

3.1 ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ СОБЫТИЙ НА ТОКИ В ГЭЦ

Как мы упоминали ранее, космические лучи – глобальные ионизаторы атмосферы в диапазоне поверхности Земли до ~ 50 км. На высотах выше 50 км присутствует только первичная компонента КЛ. Далее рассмотрим график (рис.3.2) высотных зависимостей потока КЛ J и концентрации ионов n в атмосфере Земли на широтах с различными значениями геомагнитного обрезания.

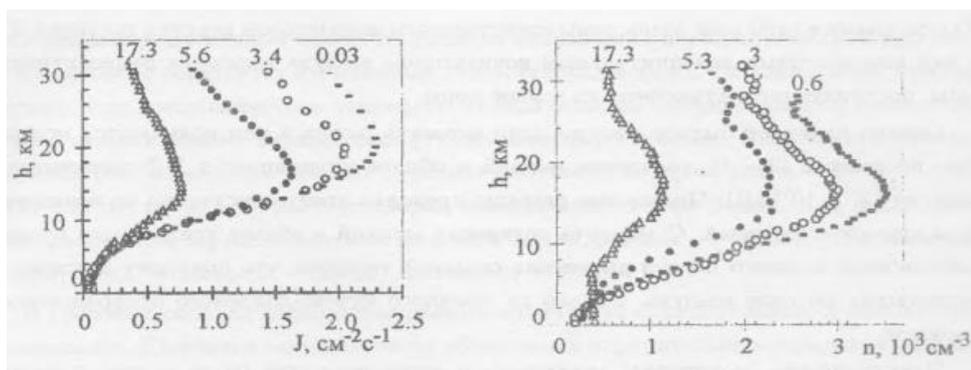


Рис. 3.2 – График зависимости потока КЛ (слева) и концентрации ионов (справа) от высоты (цифры у кривых даны в ГВ).

Как мы видим, максимальная концентрация ионов, образуемых КЛ, наблюдается на высотах (15–17 км). Над континентами в слое (0–3) км происходит дополнительная ионизация радиоактивными газами, поступающими в атмосферу из земной коры.

Солнечные вспышки имеют непосредственное влияние на электрическое поле Земли. На рис. 3.3 показано, как изменялась плотность электрического тока «воздух-Земля» над Южным полюсом по измерениям в стратосфере во время вспышки на Солнце 22 ноября 1977 г. Это событие было чётко зафиксировано в широком диапазоне энергий – от ~ 10 МэВ (на спутниках) до нескольких ГэВ. Соответствующая вспышка в 09:45 UT с гелиокоординатами $N24^\circ$, $W40^\circ$ была умеренно-сильной (балл 2В), поток протонов с энергией >10 МэВ также был умеренным ($\geq 330 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$), однако геофизические эффекты вспышки проявились достаточно наглядно. Например, типичное поглощение коротких радиоволн в полярной шапке началось уже в 11:00 UT, достигло максимума около 14:00 UT, затем продолжалось в течение 3,5 суток.

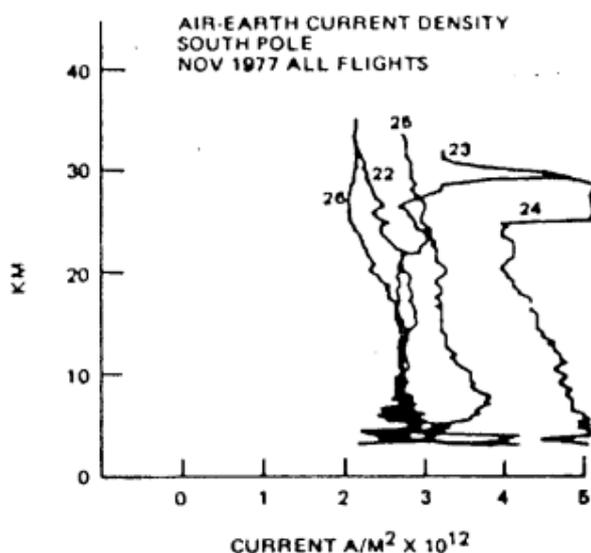


Рис. 3.3 – График изменения плотности электрического тока во время солнечной вспышки 22.11.1977 г.

Из графика видно, что накануне вспышки плотность тока имела обычный высотный профиль, а уже 23 и, особенно, 24 ноября плотность тока резко возросла (примерно в два раза на высотах 25-30 км). Затем она стала довольно быстро уменьшаться и к 26 ноября вернулась практически к исходному уровню. Ещё более детально было изучено поведение параметров ГЭЦ во время события 16 февраля 1984 г., когда удалось измерить одновременно полную проводимость атмосферы, вертикальное электрическое поле и вертикальную плотность тока.

Особенно чутко реагировали на вторжение СКЛ полная проводимость и величина вертикального тока. Особенно сильные флуктуации параметров электрического поля в стратосфере наблюдались во время большого протонного события 20 января 2005 г. В частности, было отмечено сильное увеличение вертикальной проводимости одновременно с резким возрастанием потока энергичных протонов у Земли. После максимума потока протонов в течение нескольких часов наблюдались также внезапные скачки величины вертикального электрического поля. Из этих примеров видно, что воздействие СКЛ на цепь атмосферного электричества поддаётся обнаружению путём прямых наблюдений (измерений). Существуют, однако, эффекты СКЛ, которые могут быть выявлены только путём статистического анализа. К ним относятся, в частности, вариации параметров так называемых резонансов Шумана в волноводе, образуемом двумя проводящими оболочкам – ионосферой и поверхностью Земли. Шумановские резонансы – это резонансные электромагнитные волны в полости «Земля-ионосфера» с основной частотой около 8 Гц и модами более высокого порядка, разнесёнными примерно на 6 Гц. В настоящее время принято считать, что молниевые разряды от облака к поверхности Земли в процессах глобальной грозовой активности являются главными источниками возбуждения ШР. Поскольку СКЛ, как мы видели,

меняют условия проводимости в волноводе Земля-ионосфера, то во время солнечного протонного события следует ожидать заметных вариаций в параметрах ШР. Грозовая активность усиливается также при попадании земли в высокоскоростной поток солнечного ветра, исходящий из корональных дыр.

3.2. БАЛАНС ТОКОВ В ГЭЦ.

В 1 главе мы проиллюстрировали схему ГЭЦ и токи, образующиеся при грозовой деятельности. Если рассматривать только вертикальный ток проводимости, направленный в условиях ясной погоды к земной поверхности, то потенциалы ионосферы и земли сравнялись бы через несколько часов. Однако, глобальное электрическое поле существует постоянно. Это значит, что существуют процессы, посредством которых этот ток компенсируется.

Так как ток проводимости приносит на землю положительный заряд, то для сохранения стационарным глобального электрического поля суммарное действие остальных процессов должно компенсировать этот ток.

Независимо от множества соотношения процессов и при всей зависимости их от географического расположения и времени, соотношение между токами в умеренном поясе приблизительно соответствуют результатам, полученным для Кембриджа (Великобритания). Ниже приведены значения заряда в кулонах, приносимого на площадь 1 км² в год.

Ток проводимости	+ 60 Кл/км ² год
Ток осадков	+20 Кл/км ² год
Разряды молний на землю	-20 Кл/км ² год
Токи с острий	-100 Кл/км ² год
Всего	-40 Кл/км ² год

Таб. 3.1 – Суммарное количество приносимых токов в умеренных широтах.

Исходя из данных видно, что основной вклад вносят токи с острий. Тот небольшой отрицательный баланс, который имеет место для средних широт, несомненно, должен быть иным в тропиках и, особенно, в районах мировых грозных очагов. Здесь на континентах число гроз велико, а в связи с этим велик и отток посредством тока молний и тока с острий. В то же время на значительной части земной поверхности - над океанами - ток с острий исключается, и можно предположить, что здесь будет иметь место положительный баланс. В итоге для поверхности всей Земли суммарный баланс, вероятно, окажется равным нулю и тогда указанные четыре процесса можно с полным основанием считать ответственными за поддержание равновесного состояния электрических токов между земной поверхностью и атмосферой. Но этот момент является ещё недостаточно изученным по причине недостаточности данных в областях с грозной деятельностью. Расширение сети метеостанций и улучшение чувствительности аппаратуры, возможно, смогут пролить свет на данную ситуацию.

Однако предварительные данные приводят к числам того же порядка. Если исходить из того, что каждый час в землю ударяет 100 000 молний и что каждая молния переносит в среднем 20 Кл электричества, и взять в расчёт, что число молний, подводящих к земле отрицательный заряд, примерно в четыре раза больше числа молний, приносящих положительный заряд, то плотность тока молний, распространённого на всю земную поверхность, окажется порядка $-0,7 \cdot 10^{-12}$ А/м². Принимая во внимание, что ток с острий вместе с другими указанными токами вероятнее всего будет больше в 4–5 раз, как на это указывают некоторые наблюдения, то баланс окажется нулевым. Все вышеуказанные данные наблюдений и выводы говорят в пользу модели грозного генератора электрических токов в атмосфере, поддерживающего баланс ГЭЦ, которое, в свою очередь, во многом зависит от параметров Космического излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В представленной работе было проведено исследование баланса токов в Глобальной Атмосферно-Электрической Цепи. С этой целью были изучены состав и механизмы воздействия Космического Излучения на магнитосферу и атмосферу Земли. В работе были рассмотрены как внешние, так и внутренние атмосферные процессы, в которых участвуют токи ГЭЦ. Детально рассмотрено влияние Космического Излучения на атмосферно-электрические процессы, а также дана оценка влияния Солнечной активности на параметры ГЭЦ на примерах солнечных вспышек 22 ноября 1977 г., 16 февраля 1984 г. и 20 января 2005 г.

В результате проведённого анализа были получены следующие выводы:

- 1) Глобальная Атмосферно – Электрическая Цепь является обширной системой циркуляции заряженных частиц в различных слоях атмосферы.
- 2) Космическое излучение играет огромную роль в ионизации атмосферы, запуская процессы генерирования грозовой активности. Их влияние многогранно и проявляется в разнообразных вариациях.
- 3) В настоящее время модель грозового генератора является общепринятой в вопросе о балансе токов в ГЭЦ.
- 4) Токи острий вносят наибольший вклад в отрицательный заряд атмосферы над континентами. В тоже время над океанами он отсутствует, но присутствуют остальные типы токов, что компенсирует заряд.
- 5) Существует большой потенциал изучения вклада внеземного излучения на протекание электрических процессов в ГЭЦ.

