



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

Кафедра метеорологических прогнозов


ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Исследование влияния космической погоды на полеты
воздушных судов»

Исполнитель Соколова Анастасия Павловна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)
Волобуева Ольга Васильевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой


(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«04» февраля 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| СОКРАЩЕНИЯ | 3 |
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| 1. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ | 9 |
| 1.1. Солнечные пятна | 9 |
| 1.2. Солнечная активность | 11 |
| 1.3. Число Вольфа | 13 |
| 1.4. Солнечные вспышки | 15 |
| 1.5. Корональные выбросы масс | 22 |
| 1.6. Солнечный ветер | 25 |
| 1.7. Космические лучи | 28 |
| 1.8. Магнитосфера и радиационный пояс Земли | 31 |
| 1.9. Геомагнитные бури и суббури | 36 |
| 1.10. Индексы геомагнитной активности | 38 |
| 1.11. Ионосфера | 47 |
| 2. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ПОЛЕТЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ | 54 |
| 2.1. Магнитные бури в истории человечества | 54 |
| 2.2. Нормативные документы о космической погоде | 60 |
| 2.3. Глобальные консультативные центры космической погоды | 62 |
| 2.4. Мониторинг космической погоды | 70 |
| 2.5. Влияние явлений космической погоды на радиосвязь | 78 |
| 2.6. Влияние явлений космической погоды на спутниковую навигацию | 81 |
| 2.7. Влияние явлений космической погоды на радиацию | 85 |
| 2.8. Информация о космической погоде для авиационных пользователей | 93 |
| 2.9. Примеры консультативных сообщений | 97 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3. | АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ПОЛЕТЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ | 101 |
| 3.1. | Исследование 25 солнечного цикла на основе архива сообщений о космической погоде за сентябрь 2020 – январь 2023 гг. | 101 |
| 3.2. | Исследование влияния космической погоды на высокочастотную связь на основе консультативных сообщений за 04 ноября 2021 г. | 112 |
| 3.3. | Исследование влияния космической погоды на спутниковое позиционирование на основе консультативных сообщений за 11-12 октября 2021 г. | 122 |
| 3.4. | Исследование влияния космической погоды на радиационную обстановку на основе архива сообщений о космической погоде за сентябрь 2020 – январь 2023 гг. | 131 |
| | ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 142 |
| | СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 144 |

СОКРАЩЕНИЯ

| | |
|---------------|---|
| ACE | - Advanced Composition Explorer |
| CIR | - Corotating Interaction Region |
| CME | - Coronal mass ejection (корональные выбросы масс) |
| DAYLIGHT SIDE | - освещенная сторона Земли |
| EQN | - экваториальные широты северного полушария |
| EQS | - экваториальные широты южного полушария |
| GNSS | - Global Navigation Satellite System (Глобальная Навигационная Спутниковая Система) |
| GOES | - Geostationary Operational Environmental Satellite |
| GPS | - Global Positioning System — система глобального позиционирования |
| HNH | - высокие широты северного полушария |
| HSN | - высокие широты южного полушария |
| IRI | - International Reference Ionosphere |
| MNH | - средние широты северного полушария |
| MSN | - средние широты южного полушария |
| MUF | - Maximum Usable Frequency (максимально применимая частота) |
| NASA | - Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства |
| NOAA | - Национальная администрация по океану и атмосфере |
| NSSI | - Космический институт национальной безопасности |
| ODC | - On Duty Center (дежурный центр) |
| OSO-7 | - Орбитальная солнечная обсерватория |
| SDO | - Solar Dynamics Observatory |
| SOHO | - Solar and Heliospheric Observatory |
| STEREO | - Solar TERrestrial RELations Observatory |

| | |
|------------------|---|
| SWPC | - Space Weather Prediction Center (Международные глобальные центры космической погоды) |
| UTC | - Coordinated Universal Time (Всемирное координированное время) |
| А | - Ангстрем |
| Вт | - Вольт |
| ГА | - Гражданская авиация |
| ГАМЦ | - Главный авиационный метеорологический центр |
| ГГКК | - Геостационарный Гидрометеорологический Космический Комплекс |
| ГГц | - гигагерц |
| ГКЛ | - галактические космические лучи |
| Дж | - Джоули |
| зВ | - зиверт |
| ЗДЦ | - Зональный диспетчерский центр |
| ИКАО | - Международная организация гражданской авиации |
| ИПГ им. Фёдорова | - Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Фёдорова |
| К | - Кельвины |
| кэВ | - килоэлектронвольт |
| МГц | - мегагерц |
| мЗв | - миллизиверт |
| МК | - мегаКельвины |
| мкЗв | - микрозиверт |
| нм | - нанометры |
| нТл | - нанотеслы |
| ОГЯ | - опасные гелиогеофизические явления |
| ППШ | - поглощения полярной шапки |
| ПЭС | - полное электронное содержание |
| рад | - радианы |
| РДЦ | - Районный диспетчерский центр |

| | |
|-------|--|
| РегДЦ | - Региональный диспетчерский центр |
| СКЛ | - солнечные космические лучи |
| УГМС | - Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды |
| ФАП | - Федеральные авиационные правила |
| ФПЛС | - Федерация профсоюза летного состава России |
| ЦПИ | - Центры полетной информации |
| ЦУП | - Центр управления полетами |
| эВ | - электронвольт |

ВВЕДЕНИЕ

Космическая погода — это совокупность различных физических процессов и явлений, которые возникают на поверхности Солнца, в межпланетном и околоземном космическом пространстве, а также в магнитосфере, ионосфере и верхних слоях атмосферы Земли. Термин «космическая погода» относительно новый и используется в широком употреблении в научно-исследовательской литературе начиная с 1990-х годов. Космическая погода оказывает колоссальное влияние на функционирование всевозможных технических устройств и систем, привычных в повседневной жизни человека: это и системы навигации и связи, электроэнергетика, радиационная безопасность экипажа и пассажиров воздушных судов и прочее.

Опасные гелиогеофизические явления (ОГЯ), которые и являются основным источником угрозы для полетов воздушных судов, появляются из-за солнечных вспышек, корональных выбросов масс и солнечного ветра. Взаимодействуя с магнитосферой Земли, перечисленные явления вызывают возмущения, более знакомые нам как суббури и магнитные бури. Чаще всего влияние солнечной активности на нашу планету не видно невооруженным глазом, однако есть исключение — это полярные сияния.

Возмущения космической погоды опасны не только для спутниковых аппаратов в околоземном пространстве, но и для полетов воздушных судов в тропосфере. Геомагнитные бури и суббури нарушают спутниковую навигацию и мешают корректному определению местоположения самолета в пространстве, способны привести к частичному или даже полному отсутствию высокочастотной связи, что особенно важно при трансполярных и трансокеанических перелетах. Помимо вышеперечисленного, непрерывные потоки плазмы, исходящие от Солнца, а также солнечные и галактические космические лучи несут вред для здоровья экипажа и пассажиров воздушных судов из-за повышения допустимого уровня радиации на высотах.

Целью работы является исследование элементов космической погоды как опасного для полетов авиации явления, ее влияние на воздушное судно, способны прогнозирования и предупреждения опасных гелиогеофизических событий.

Поставленная цель решалась с помощью следующих задач:

1. собрать базу данных консультативных сообщений о космической погоде за период сентябрь 2020 – январь 2023 гг;
2. определить повторяемость опасных гелиогеофизических явлений по случаям и зонам их возникновения;
3. провести анализ взаимосвязи и целесообразности выпуска консультативных сообщений и активности Солнца за двадцать пятый солнечный цикл;
4. проанализировать влияние солнечной активности на ионосферу и высокочастотную связь на примере геомагнитной бури и консультативных сообщений за 3-4 ноября 2021 года;
5. проанализировать влияние солнечной активности на спутниковое позиционирование систем GPS и ГЛОНАСС на примере геомагнитных возмущений и консультативных сообщений за 11-12 октября 2021 года;
6. проанализировать влияние солнечной активности на радиационную обстановку 12 октября 2021 года на основании метода расчета от ИПГ им. Фёдорова;
7. сравнить изменения уровня дозы радиации в зависимости от высоты полета, широты маршрута и солнечной активности.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, заключения и трех глав.

В первой главе рассматриваются теоретические основы солнечной активности: причины ее возникновения, опасные гелиогеофизические явления, влияние солнечной активности на магнитосферу и ионосферу, геомагнитные бури и суббури как явления, возникающие в околоземном

пространстве и в верхней атмосфере, а также методы их прогнозирования и индексы геомагнитного возмущения.

Во второй главе рассматриваются способы донесения информации о возмущениях космической погоды для авиационных пользователей, консультативные центры космической погоды, влияние солнечной активности на высокочастотную связь, спутниковую навигацию и радиационную обстановку, а также приводятся примеры консультативных сообщений с их дальнейшей расшифровкой.

В третьей главе проводится анализ полученных консультативных сообщений за период сентябрь 2020 – январь 2023 гг. и влияние возмущений космической погоды на высокочастотную связь, спутниковую навигацию и уровень радиации в атмосфере.

1. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

1.1 Солнечные пятна

Излучение Солнца происходит непрерывно. Можно сказать, что именно Солнце и является главным источником формирования космической погоды, вернее, солнечная активность, возникающая на его поверхности и достигающая околоземного пространства и верхних слоев атмосферы. И из-за того, что солнечная активность может носить вспышечный характер, такие «неоднородности» в виде солнечных вспышек, возмущений в солнечной короне, резких всплесков и увеличения уровня рентгеновского и ультрафиолетового излучения, нарушают стабильность магнитосферы и ионосферы нашей планеты.

Солнечная активность — это результат взаимодействия плазмы, магнитных полей, вращения светила и различных конвективных движений. Ее можно отслеживать с помощью изменения числа солнечных пятен на поверхности Солнца. Данные активные области образуются там, где возникают возмущения магнитного поля Солнца: силовые линии проникают в область короны сквозь фотосферу, где сильное магнитное поле не дает развиваться конвективным движениям максимально разогретой плазмы и, соответственно, перенести энергию из внутренних областей Солнца наружу. Схема возникновения солнечного пятна приведена на рисунке 1 [4].

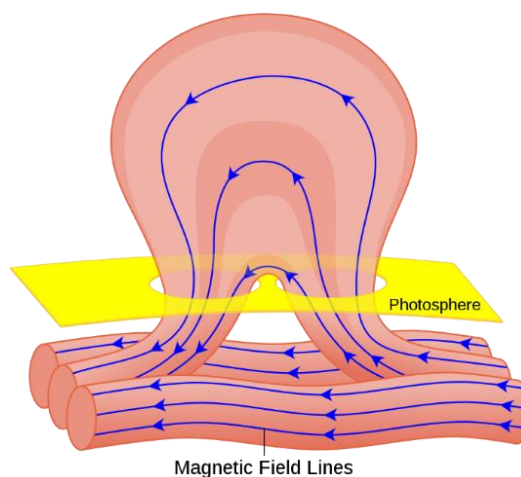


Рисунок 1 – Образование солнечного пятна

Сначала в месте возмущения магнитного поля возникает факел — яркое контрастное поле, окружающее будущее солнечное пятно. Затем в месте разрыва однородности фотосферы появляется затемнение диаметром в несколько тысяч километров — «пора». В течении следующих часов магнитная индукция начинает возрастать, размер и количество «пор» также увеличивается, причем «поры» начинают сливаться друг с другом и образовывать одно большое пятно или даже целую группу, протяженность которой может быть от 7 тысяч до 50 тысяч км.

Срок жизни солнечных пятен редко превышает несколько месяцев. Стоит отметить, что так как поверхность Солнца не твердая и скорость вращения светила неодинаковая (на экваторе период вращения меньше, чем в полярных областях), пятна имеют свойства перемещаться. Солнечные пятна можно обнаружить даже невооруженным глазом благодаря их высокой контрастности — температура в местах затемнения понижена примерно на 1500 К относительно окружающей их фотосферы. Столь значительное понижение температуры внутри солнечных пятен, как отмечалось ранее, связано с подавлением привычных конвективных движений плазмы магнитным полем светила, и, соответственно, постепенном «остывании» этого участка.

Пятна — это области повышенной активности на поверхности Солнца. Если пятен возникает очень много, может произойти рекомбинация

магнитных силовых линий одной группы пятен с другой, и видимым результатом такого пересоединения силовых линий будет солнечная вспышка. Достигнув околоземного космического пространства, такой высокоскоростной плазменный поток способен не только нарушить магнитосферу нашей планеты и вызвать сбои в работе спутников и наземной электронной техники, но и подвергнуть флуктуации ионосферу Земли и изменить или прервать передачу радиоволн коротких диапазонов. Все эти нарушения в магнитосфере Земли принято называть магнитными бурями [12].

Пример солнечных пятен и солнечной вспышки приведен на рисунке 2.

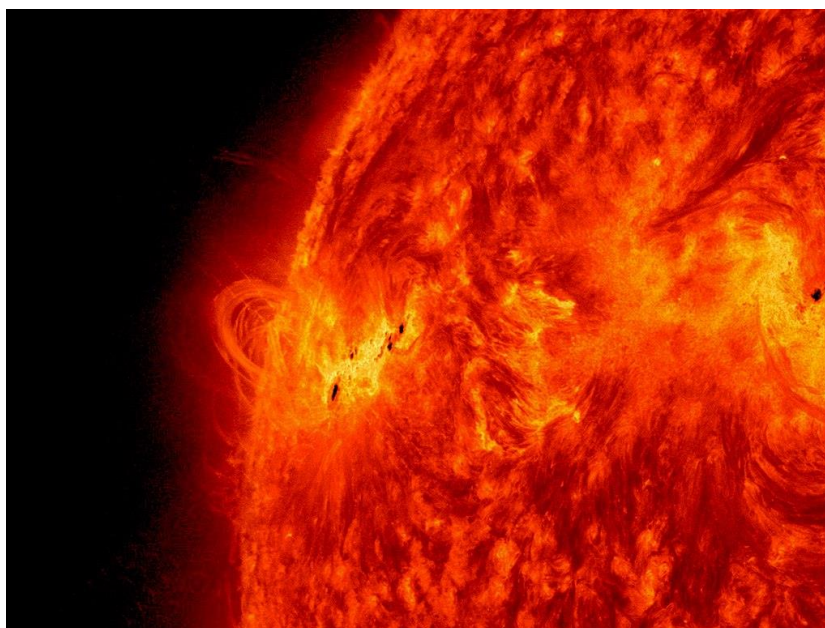


Рисунок 2 – Снимок с SDO, показывающий активность Солнца в виде солнечных пятен и солнечной вспышки, произошедшей в мае 2013 г

1.2 Солнечная активность

Цикл солнечных пятен и цикл солнечной активности тесно связаны друг с другом, причем часто именно изменение количества и размера пятен используются в качестве индикатора смены цикла и, как следствие, смены условий космической погоды. Кроме того, важным фактором является и то, что наблюдения за солнечными пятнами очень удобны и просты в

осуществлении, тогда как фиксирование галактических космических лучей, корональных выбросов масс и солнечного ветра сложнее осуществить.

Стоит отметить, что наблюдения за солнечными пятнами имеют долгую историю. Можно сказать, что современные наблюдения начались около четырехсот лет назад, когда Галилео Галилей и другие астрономы Европы заметили темные пятна на поверхности светила. Благодаря этому мы можем проследить за солнечной активностью начиная с тех времен.

Периодические изменения в солнечной активности бывают различной длины. Лучше всего изучен и наиболее часто используется «цикл Швабе» длительностью около 11 лет условно, так как он может длиться от 7 до 17 лет. «Цикл Швабе» характерен быстрым ростом количества солнечных пятен и медленным его уменьшением: в начале цикла от нескольких дней до пары недель на Солнце отсутствуют пятна, тогда как в конце периода стабильно существуют единичные пятна и около двадцати скоплений.

Удвоенный цикл Швабе называют «циклом Хейла» — он был введен после того, как ученые заметили некую регулярность в распределении групп солнечных пятен. Если группа солнечных пятен образовалась в северной полусфере Солнца, то в предыдущем цикле пятна были на южной полусфере, то есть при окончании одного цикла и начале следующего полярность уравнивается. Следовательно, полный солнечный цикл со сменой полярности занимает 22 года.

Также существуют вековые и двухвековые циклы, где в качестве минимумов можно рассматривать устойчивые понижения активности Солнца длительностью несколько десятков лет, и тысячелетние циклы, основанные на радиоуглеродном анализе. На графике ниже приведен пример изменения чисел Вольфа, рассмотренных далее, за прошедшие три века. Хорошо видны 11-летние циклы и вековые [4].

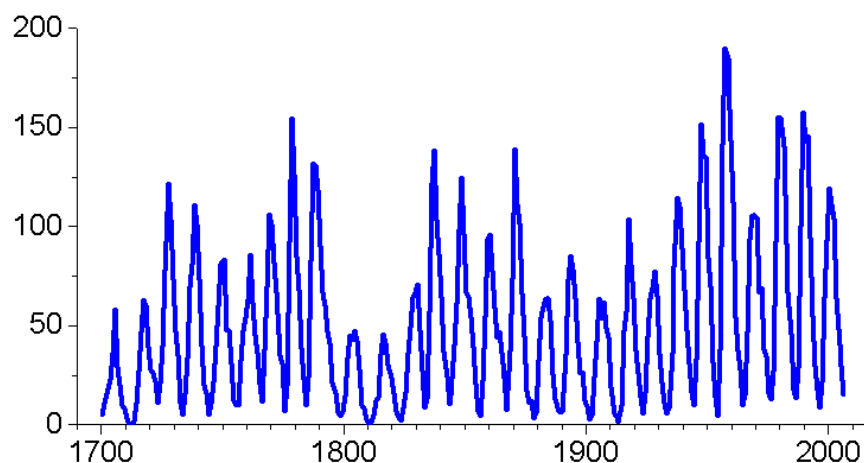


График 1 – Солнечная цикличность за последние три века

На данный момент текущий солнечный цикл двадцать пятый. Его начало пришлось на декабрь 2019 года, окончание ожидается в 2030 году.

1.3 Число Вольфа

Число Вольфа — это один из специальных индексов, введенных для характеристики уровня активности Солнца, связанный с количеством пятен на поверхности светила. В 1852 году швейцарский ученый-астроном Рудольф Вольф подтвердил теорию о цикличности на основе собранного за два столетия материала и предложил специальный числовой показатель. Благодаря простоте формулы, число Вольфа широко распространено в метеорологических прогнозах и прогнозах нарушения распространения радиоволн в связи с флуктуациями ионосферы.

Число Вольфа (W) вычисляется следующим образом [4]:

$$W = k(f + 10g), \quad (1)$$

Где: f - количество наблюдаемых отдельных пятен в данный момент;
 g - количество наблюдаемых групп пятен в данный момент;
 k - нормировочный коэффициент, подсчитанный для конкретной обсерватории, или для конкретного телескопа, или для наблюдателя.

В настоящее время официальные среднегодовые и среднемесячные значения чисел Вольфа производятся в Бельгии, в Центре анализа данных по влиянию Солнца при Королевской астрономической обсерватории в Цюрихе, и именно их вычисления используются в различных научных работах. В России также часто используется пулковский ряд чисел Вольфа, он ведется с 1933 года.

Несмотря на простоту подсчетов, есть несколько особенностей. Например, так как солнечные пятна различны по величине, самые маленькие или вышеупомянутые «поры» заметны только в специализированные телескопы и при хорошей погоде, тогда как крупные пятна ошибочно могут быть приняты за группы пятен.

В связи с этим можно сказать, что число Вольфа зачастую является сугубо статистической величиной, и невозможно получить одинаковые результаты даже при одной исследовательской программе. Также влияют и параметры применяемой аппаратуры, и время и методы производимых наблюдений. Ежедневные вычисления числа Вольфа могут отличаться друг от друга вплоть до 25%, поэтому принято использовать среднемесячные и среднегодовые значения [4].

На графике 2 приведен цюрихский ряд среднемесячных чисел Вольфа.

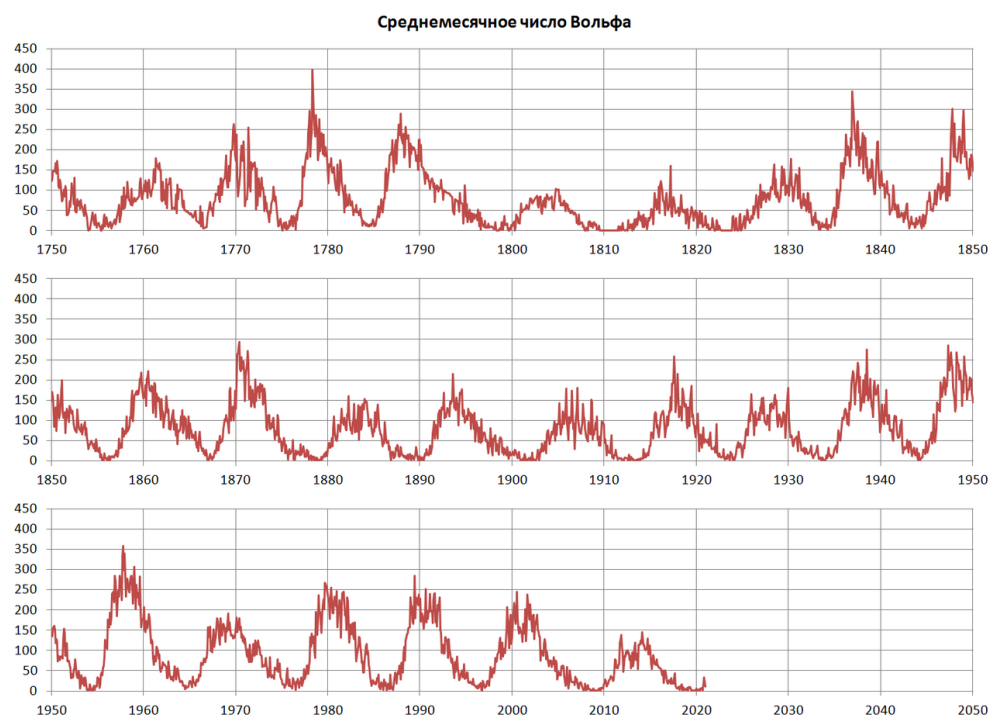


График 2 – Цюрихский ряд среднемесячных чисел Вольфа

1.4 Солнечные вспышки

Солнечные вспышки представляют собой взрывной процесс с интенсивным выделением энергии (световой, тепловой и энергетической) в атмосфере Солнца. Этот объем энергии может достичь колоссальных значений — 6×10^{25} Дж или 160 млрд мегатонн в тротиловом эквиваленте. Данный процесс охватывает абсолютно все слои солнечной атмосферы: фотосферу, хромосферу и корону. Зачастую солнечные вспышки сопровождаются корональным выбросом масс [3,12].

Формирование солнечных вспышек происходит следующим образом: из-за воздействия магнитного поля на плазму происходит ее сжатие, в следствии чего возникает плазменная лента или жгут, которые могут быть в длину до сотни тысяч километров. Плазма в данном месте нагревается до 10 миллионов К, что приводит к резкому возрастанию кинетической энергии. Происходит взрыв — вещества и частицы, движущиеся в короне Солнца,

получают дополнительную энергию; потоки протонов, электронов и иных высокозаряженных частиц на больших скоростях (достигающих отметку 1000 км/с) покидают солнечную атмосферу и устремляются в межпланетное пространство. Из-за солнечных вспышек значительно увеличивается рентгеновское, оптическое, радио- и гамма-излучение. Мощность и частота вспышек напрямую зависят от фазы солнечного цикла.

Было замечено, что солнечные вспышки происходят там, где взаимодействуют солнечные пятна противоположной магнитной полярности, чаще всего около нейтральной линии магнитного поля, разделяющей южную и северную полусферу Солнца. Зоны таких солнечных пятен называют активными областями. Центр прогнозов космической погоды Национальной администрации по океану и атмосфере (NOAA) нумерует такие группы солнечных пятен для удобства потребителей. Пример группы пятен приведен на рисунке ниже. Активные области особенно многочисленны и характерны для периода максимальной солнечной активности. Также на сайте NOAA каждая такая группа пятен тщательно изучается геофизиками на предмет возможного возникновения солнечной вспышки. Важными факторами является размер активной области, ее перемещение и характеристики магнитных полей [15].

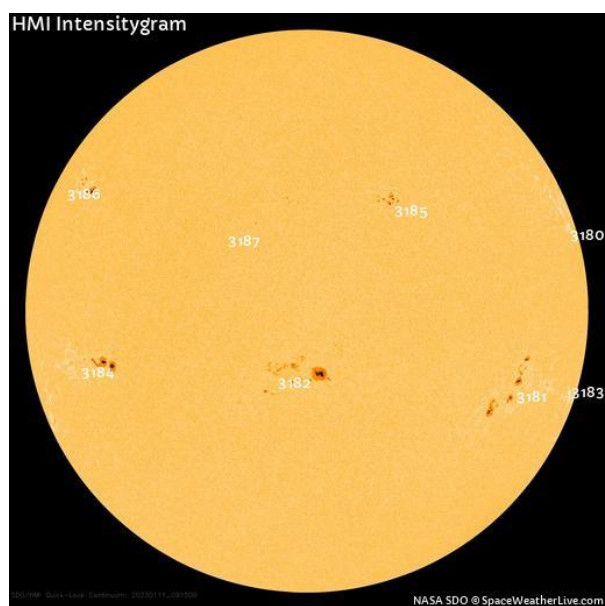


Рисунок 3 – Снимок с SDO пронумерованных солнечных пятен

История наблюдений за солнечными вспышками относительно мала: начиная с 1890-х ученые осуществляли попытки сфотографировать «белые всплески», один из таких снимков приведен в качестве примера ниже [23]. В двадцатом веке классификация мощности проводилась по площади свечения в линии излучения водорода H_{α} , то есть в большей степени по нагреву нижних слоев хромосферы — и, соответственно, по видимому диапазону спектра.



Рисунок 4 – Фотография солнечной вспышки 1895 г.

Так было до тех пор, пока в 1970 году американский ученый-космонавт Дэниел Н. Бейкер не предложил новую классификацию, основанную на мощности уже в рентгеновском диапазоне. Это стало возможным благодаря датчикам на искусственных спутниках Земли, которые измеряли амплитуду теплового рентгеновского всплеска с длиной волны в пределах 0,5 – 8 ангстрем и энергией 0,5 – 10 кэВ. Изначально для изучения использовались спутники серии «Solrad», теперь же используются серия специальных метеорологических спутников GOES. На данный момент спутник GOES-15 находится над Тихим океаном на геостационарной орбите, и пиковый поток рентгеновского излучения измеряется прибором XRS (Solar X-Ray Sensor) нового поколения. Кроме того, рентгеновский диапазон более точно фиксирует процесс солнечной вспышки: в оптическом диапазоне излучение

увеличивается на доли процентов даже при большой мощности, тогда как в области мягкого рентгеновского излучения (1 нм) излучение увеличивается на несколько порядков, что значительно удобнее. Спокойное Солнце не излучает в жёстком рентгеновском диапазоне ($<0,3$ нм) вообще и возникает только во время солнечных вспышек, в результате не создавая ложные данные. Классификация Бейкера наиболее известна для обычных потребителей — каждой солнечной вспышке присваивается балл, обозначенный латинской буквой А, В, С, М или Х. Таблица приведена ниже [15,16]:

Таблица 1 – Классификация солнечных вспышек по мощности
рентгеновского потока

| Буква | Интенсивность в пике (Вт/м ²) |
|---------|---|
| А-класс | мощность потока 10^{-7} Вт/м ² и меньше |
| В-класс | мощность потока $10^{-7} - 10^{-6}$ Вт/м ² |
| С-класс | мощность потока $10^{-6} - 10^{-5}$ Вт/м ² |
| М-класс | мощность потока $10^{-5} - 10^{-4}$ Вт/м ² |
| Х-класс | мощность потока 10^{-4} Вт/м ² и больше |

Также стоит отметить, что каждый класс делится на подклассы от 1 до 9 (то есть от А1 до А9, от М1 до М9 и т.п.). Соответственно вспышка М2 в два раза мощнее вспышки М1 и в четыре раза мощнее вспышки С5. Х-класс не заканчивается на 9 подклассе и продолжается. Иногда особо мощные вспышки из этого класса называют Super Х-класс. К примеру, самой мощной вспышкой считается вспышка, произошедшая 4 ноября 2003 года, ей был присвоен класс Х28, что соответствует мощности излучения на пике, равной 28×10^{-4} Вт/м². Причем измерения датчиков орбитальных станций не могут быть признаны точными, так как приборы на одиннадцать минут «зашкалили», не справившись с такой интенсивностью. Магнитная буря, порожденная этот

вспышкой, достигла экстремальных значений G5, однако ученые Космического института национальной безопасности (NSSI) считают, что если бы вспышка была направлена на нашу планету, то индекс Kp ровнялся бы отметки 10. Спустя сутки солнечный ветер достиг околоземного пространства, вызвав перебои в высокочастотной радиосвязи и различных электронных системах, а также из-за неточности определения местоположения многие искусственные спутники Земли и орбитальные станции или вышли из строя, или даже сошли с орбиты (к примеру, траектория полета МКС «опустилась» на 7 км ближе к Земле) [12,14].

На рисунке ниже представлены графики Kp и G за период 30 октября 2003 – 1 ноября 2003 и снимок солнечной вспышки в ультрафиолетовом диапазоне светового спектра [13].

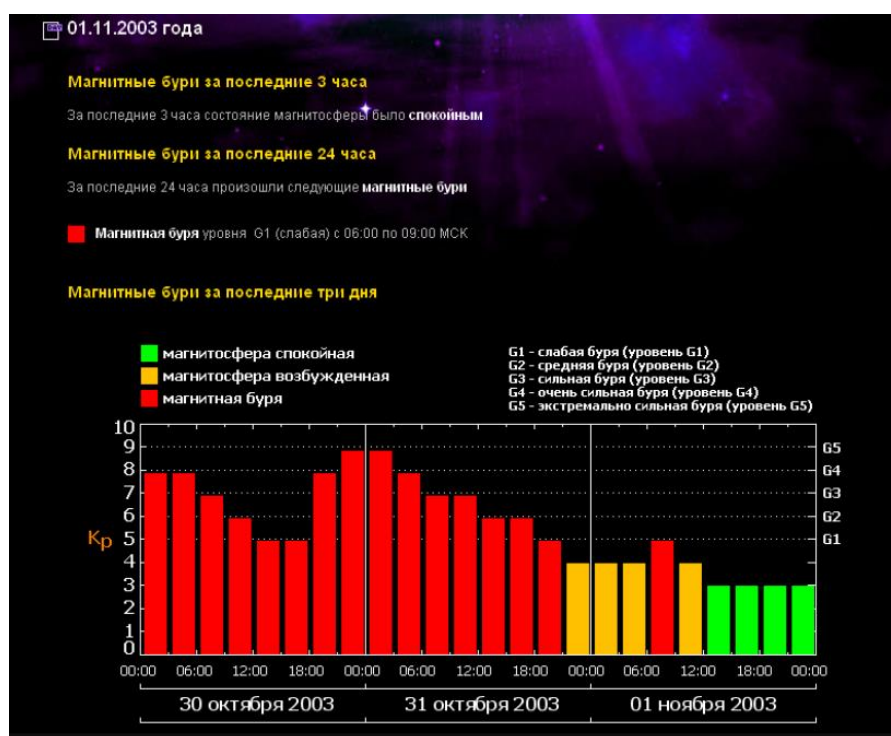


Рисунок 5 – Магнитная буря, связанная с мощной солнечной вспышкой

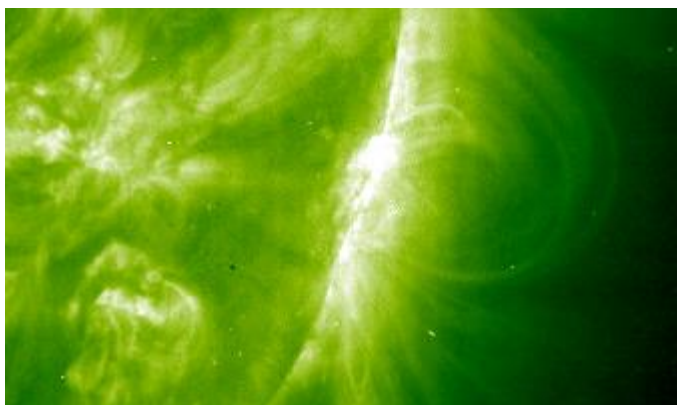


Рисунок 6 – Снимок вспышки 4 ноября 2003 г.
в ультрафиолетовом диапазоне

Самые распространённые солнечные вспышки — это А и В-классов. Вспышки класса С практически не оказывают воздействия на Землю из-за небольшой мощности и «медлительности» направленных в космическое пространство потоков. Выброс корональной массы может произойти при достаточной длительности вспышки, однако геомагнитные возмущения незначительны. Вспышки М-класса способны вызвать до умеренных радиопомех на освещенной Солнцем стороне Земли и небольшой радиационный шторм — при направленных на нашу планету потоков активных частиц на средних широтах можно будет наблюдать северные сияния [10].

Солнечные вспышки Х-класса вызывают наибольший интерес. В среднем за год происходит около 10 таких вспышек, чаще всего при солнечном максимуме. Они оказывают непосредственное влияние на все аспекты жизни человека: от технических помех до проблем со здоровьем. На освещенной Солнцем стороне Земли уровень радиопомех достигает сильных и экстремальных значений, при направленности солнечной вспышки на нашу планету произойдет сильная и продолжительная магнитная буря (G4 и G5-классов). Вспышки мощностью более X9 — так называемые Super X-класса —

происходят очень редко, всего пару раз в течении 11-летнего солнечного цикла. На рисунке ниже показан пример солнечной вспышки X-класса [15].

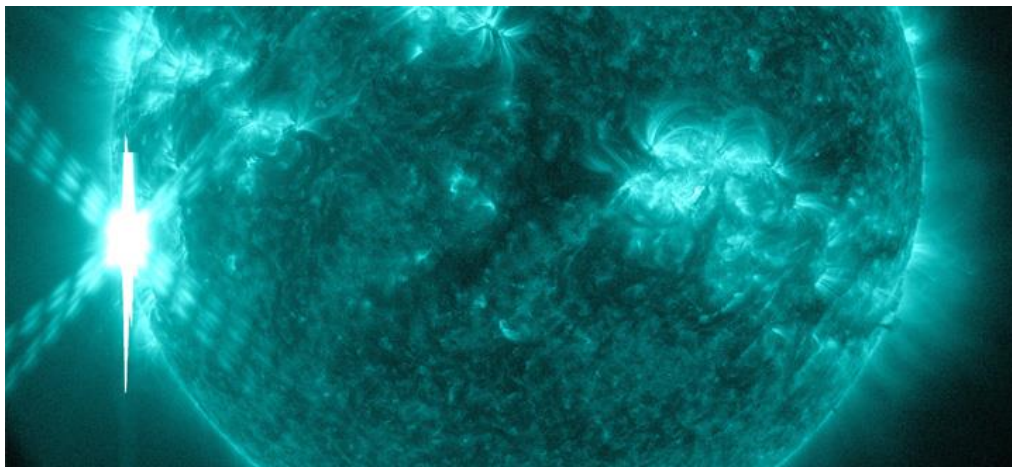


Рисунок 7 – Снимок солнечной вспышки с SDO в длине волны 131 Ангстрем

Естественно, сильные солнечные вспышки имеют последствия. Излучение, возникающее при солнечных вспышках, особенно жесткое ультрафиолетовое и рентгеновское, оказывает сильное влияние на свойства ионосферы — орбиты искусственных спутников Земли снижаются за счет повышения плотности верхней атмосферы в целом. Потоки заряженных частиц также несут опасность. Как указывалось выше, они способны повредить аппаратуру не только космических летательных аппаратов, но и самолетов, особенно при полетах на высоких эшелонах и в полярных широтах. Кроме того, плазменные облака, которые и приводят к возникновению геомагнитных бурь на Земле, влияют не только на технику, но и на здоровье людей.

Прогнозирование солнечных вспышек проводится путем анализа магнитных полей, но из-за того, что солнечная магнитная структура крайне неустойчива и неоднородна, спрогнозировать солнечную вспышку хотя бы за неделю до ее возникновения уже невозможно. Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) составляет

прогноз длительностью от 1 до 3 дней, причем в спокойные дни солнечной активности вероятность возникновения солнечной вспышки не превышает 5%, в то время как в активные периоды вероятность составляет уже 40% [15].

1.5 Корональные выбросы масс

Корональные выбросы массы (CME — Coronal mass ejection) представляют собой огромный выброс плазмы из солнечной короны в гелиосферу, оттуда в космическое пространство. Это явление достаточно трудно наблюдать с наземных станций, поэтому первые снимки в видимом диапазоне были произведены с помощью коронографа, установленного на борту SDO. Зачастую из-за затмевающего диска непосредственно самого прибора наблюдения за корональными выбросами затруднены, так как поверхность Солнца оказывается скрыта, и тогда измерения проводятся на основе данных других датчиков и на других длинах волн. Также стоит учитывать, что чем ближе спутник с коронографом к Земле, тем больше «затемнение» солнечного диска и тем сложнее определить направление CME. В настоящее время для преодоления технических трудностей используются два парных гелиоцентрических космических аппарата STEREO (Solar TErrestrial RElations Observatory). Несмотря на их близость к орбите нашей планеты, они могут производить наблюдения за Солнцем с двух разных точек, используя стереоскопический эффект за счет того, что один из аппаратов постепенно обгоняет Землю, тогда как другой, напротив, от нее отстает. STEREO получают трехмерные изображения всех процессов, происходящих на Солнце. Примеры снимков приведены ниже.

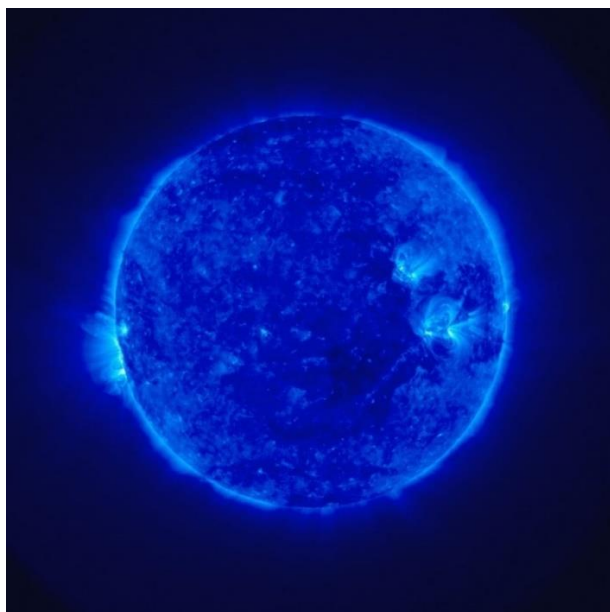


Рисунок 9 – Стереоскопическое изображение Солнца, полученное с аппаратов STEREO

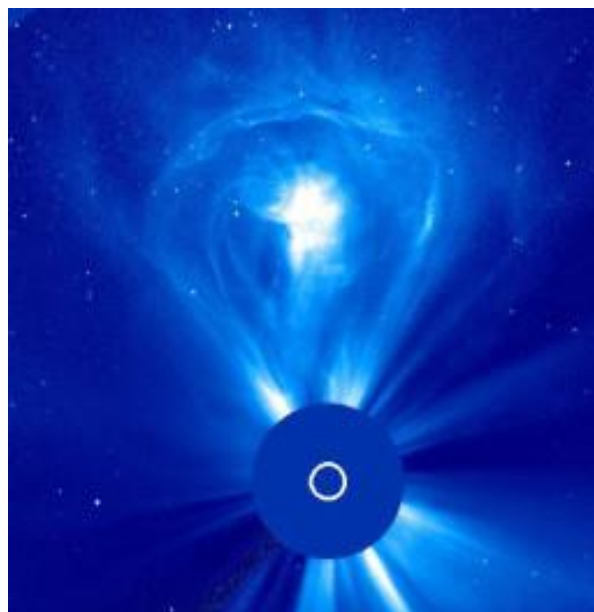


Рисунок 10 – Выброс корональной массы, изображение с коронографа LASCO. Белый круг представляет собой размеры Солнца

Наибольшее количество корональных выбросов происходит во время максимума солнечной активности. Ранее были рассмотрены солнечные вспышки, и упоминалось, что энергия, высвобождаемая во время вспышек, реализуется в виде электромагнитного излучения, тогда как СМЕ расходуют свою энергию на ускорение колоссальных масс солнечной плазмы. Корональные выбросы не всегда сопоставимы с солнечными вспышками. Ранее астрофизики считали, что это проявления одного и того же процесса, вызванного нестабильностью магнитных полей. Теперь же считается, что данные явления могут иметь один источник энергии, и если этой энергии достаточно, то могут происходить и корональные выбросы, и солнечные вспышки, причем с минимальными временными и пространственными интервалами. Однако после запуска аппаратов STEREO были зарегистрированы СМЕ без солнечных вспышек и каких-либо явлений на Солнце.

Выброшенное при СМЕ вещество представляет собой плазму, чей состав — это электроны, протоны, гелий, кислород и ряд более тяжелых элементов. Большинство выбросов происходит из активных областей, представляющих собой группу солнечных пятен. Часто их называют корональными дырами — области в короне Солнца с низкой температурой и, как следствие, с пониженной светимостью, в следствии чего на космических снимках в видимом диапазоне корональные дыры выглядят как темные пятна. Корональные дыры часто расположены на солнечных полюсах и связаны с областями, где деформируются силовые линии магнитного поля.

Мощный корональный выброс способен выйти за пределы солнечной атмосферы и достичь межпланетного пространства. Скорость коронального выброса огромна — до 3200 км/с, в среднем выбросу необходимо около трех дней, чтобы добраться до Земли. При столкновении с магнитосферой нашей планеты СМЕ вызывают полярные сияния, геомагнитные бури, в редких случаях — при очень сильном выбросе — повреждение электрических сетей, как было в 1859 году. Тогда в США вышла из строя телеграфная сеть. Это событие наиболее известно как событие Кэррингтона.

Интересен сам процесс возникновения геомагнитной бури. Когда корональный выброс достигает магнитосферы, идет ее деформация, причем неоднородная: на дневной стороне происходит сжатие слоя, на ночной — расширение. При встрече этих двух слоев высвобождается огромная энергия (около 10^{12} Вт), которая направляется обратно в верхнюю атмосферу и нарушает радиопередачу и, как уже упоминалось ранее, вызывает неполадки в подаче электроэнергии и даже повреждает аппаратуру спутников. Высокозаряженные частицы солнечной энергии могут быть причиной полярных сияний вокруг магнитных полюсов, изредка в более южных широтах. Также корональные выбросы масс представляют угрозу для здоровья людей, находящихся не только в околоземном или космическом пространстве, но и при полете на высоких эшелонах [12].

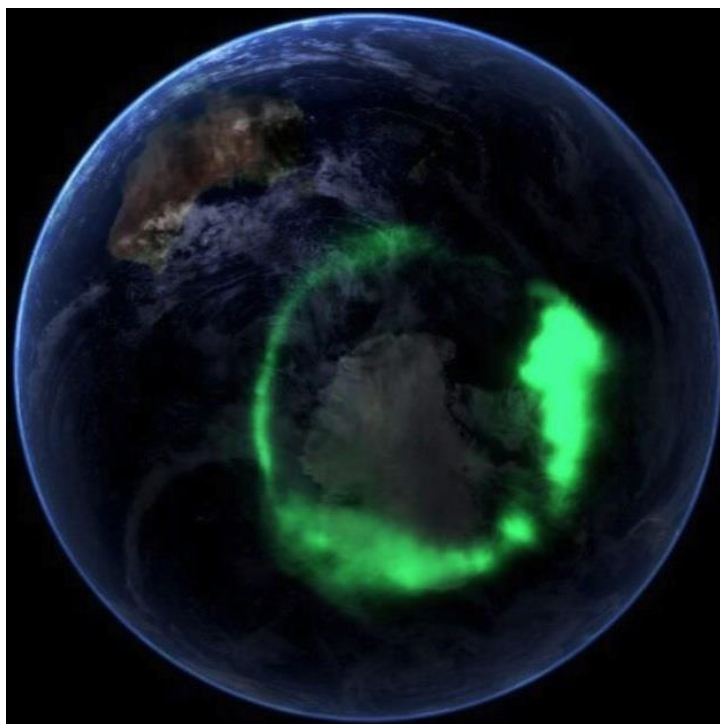


Рисунок 11 – Австралийское сияние 11 сентября 2005 г.

1.6 Солнечный ветер

Солнечный ветер — поток высокозаряженных ионизированных частиц, исходящий из верхних слоев атмосферы с высокими скоростями (порядка 300 – 1200 км/с) в космическое пространство. В отношении других крупных святил принят термин «звездный ветер». Как и в случае с корональным выбросом масс, солнечный ветер состоит из плазмы — электронов, протонов и иных частиц с кинетической энергией до 10 кэВ. Однако между солнечным ветром и корональными выбросами есть существенное различие: солнечный ветер — это постоянная компонента строения Солнца, на ряду с фотосферой, хромосферой и короной [9].

Как известно, Солнце находится не в твердом, а в газообразном состоянии, и этот газ удерживается гравитационными и магнитными силами. Солнечная корона — это внешняя граница Солнца, и точка ее перехода во внутреннюю границу космического пространства называется Альфвеновской

поверхностью. Это предельная черта, где гравитация и магнитное поле слишком слабы, чтобы удерживать плазму на месте и «вернуть» ее обратно на поверхность Солнца. Поверхность Альфвена неравномерна, имеет выступы и впадины, что было доказано в 2021 году космическим зондом NASA Parker Solar Probe. Солнечный ветер движется быстрее магнитозвуковой волны и является сверхзвуковым явлением [15].

В начале XX века ученые вели споры по поводу возникновения геомагнитных бурь. Тогда же впервые была выдвинута гипотеза, что корональные выбросы масс не единственная причина магнитных возмущений на Земле, и Солнце постоянно испускает некое вещество, которое регулярно достигает поверхности нашей планеты, не только во время солнечных вспышек и СМЕ. Также ученые долгое время наблюдали за кометами, и увидели, что хвост кометы вне зависимости от ее траектории движения всегда направлен в сторону от Солнца — то есть некий поток частиц отталкивает его. В 1957 году Юджин Паркер, американский астрофизик, связал данный феномен с тем, что солнечная гравитация ослабевает по мере удаления от ядра Солнца, а значит солнечная корона в какой-то момент способна покидать гравитационное поле и проникать в космическое пространство — и привнес в науку официальное понятие солнечного ветра. Позже слова ученого подтвердили многочисленные наблюдения из космоса, в том числе с советских космических аппаратов «Луна» и «Венера», а также вышеупомянутые парные спутники STEREO и солнечный зонд Parker, названный в честь астрофизика.

Солнечный ветер бывает медленный и быстрый. Чаще всего в околоземном пространстве присутствует медленный солнечный ветер со скоростью до 500 км/с, не самой высокой температурой около 100 МК и составом, близким к исходному составу короны. Быстрый солнечный ветер обладает средней скоростью 750 км/с, температурой выше 800 МК и соответствует составу фотосферы (то есть водороду, гелию и некоторым тяжелым элементам, таким как кислород, углерод, неон и железо). Медленный солнечный ветер плотнее быстрого. Ученые предполагают, что быстрый

солнечный ветер возникает из корональных дыр, тогда как медленный исходит из так называемого «пояса стримеров» — экваториальной области, где магнитные потоки образуют петли, соединяющие солнечные пятна. Эти замкнутые петли способны удерживать внутри плазму и высокозаряженные частицы. На снимке с LASCO, представленном ниже, виден солнечный ветер, распространяющийся во все стороны от Солнца, и стримеры [15, 16].

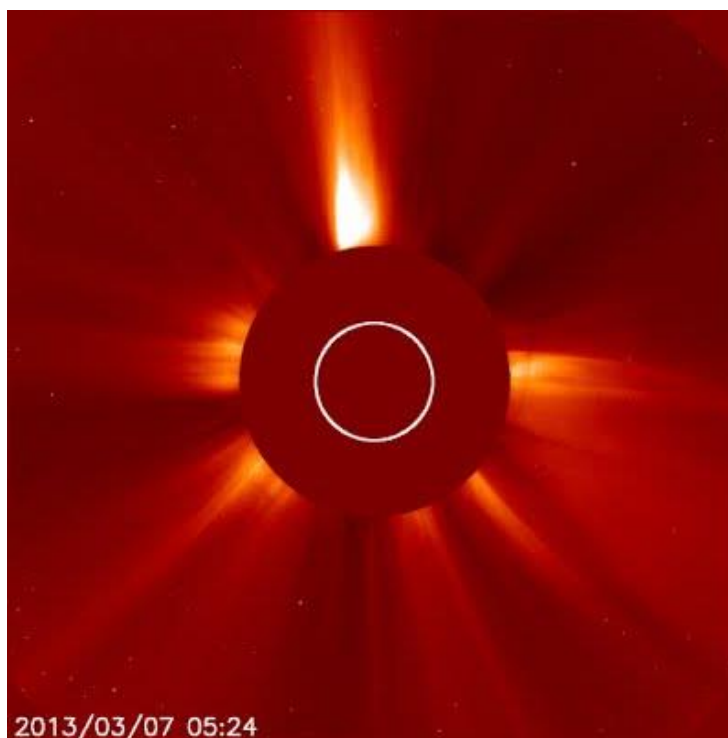


Рисунок 12 – Солнечный ветер и солнечные стримеры,
снимок с LASCO

Интенсивность солнечного ветра во многом зависит от солнечной активности. Быстрый солнечный ветер может длиться несколько месяцев и иметь период в 27 суток — то есть оборот Солнца вокруг своей оси. Солнечный ветер может прерываться из-за внезапных всплесков солнечной плазмы, уже известных нам как корональные выбросы масс.

Солнечный ветер опасен и нарушает магнитное поле Земли. Также, как и корональные выбросы масс, солнечный ветер вызывает магнитные бури, полярные сияния, нарушает радиосвязь и работу электроприборов, способствует сбоям в инженерных сетях и помехам в работе компьютерной

техники, а также в функционировании спутников и систем GPS, что особенно катастрофично для летательных аппаратов [12].

1.7 Космические лучи

Прежде всего стоит рассмотреть само понятие космических лучей — это различные элементарные частицы, обладающие высокой энергией и движущиеся в межпланетном пространстве. Космические лучи могут возникнуть в нашей Галактике и вне ее. Также одним из источников является Солнце. Космические лучи бывают первичные (это солнечные, галактические и внегалактические) и вторичные (возникшие под действием первичных в атмосфере планеты). Космические лучи составляют естественную — или фоновую — радиацию Земли. Также долгое время космические лучи являлись единственным источником таких высокоэнергичных элементарных частиц как позитрон и мюон, причем диапазон энергий находится в пределах от 10^6 эВ до 5×10^{21} эВ. Космические лучи состоят преимущественно из протонов (92%) и ядер гелия (6%), остальные тяжелые элементы и электроны занимают оставшиеся проценты [9].

Некое ионизирующее излучение, исходящее из космоса, впервые было обнаружено в начале XX века при опытах по проводимости газа. Обнаруженный ток в газе не удалось объяснить естественной радиацией Земли и связанной с этим ионизацией. К тому же выяснилось, что данное излучение растет с высотой, тогда как ионизация должна была падать — то есть излучение внеземного происхождения направлено сверху вниз. Позже в ряде экспериментов было открыто свечение Вавилова-Черенкова, доказавшее следы космических частиц, затем позитроны и прочие высокоэнергетические частицы и, наконец, в 1958 году введено понятие радиационный пояс Земли.

Довольно часто космические лучи делят на стационарные (галактические, частицы альbedo, радиационный пояс) и нестационарные (солнечные космические лучи).

Галактические космические лучи (ГКЛ) — космические частицы, попадающие в околоземное космическое пространство из нашей Галактики. Наиболее вероятный их источник — вспышки сверхновых звезд и пульсары. Пульсар — нейтронная звезда, оставшаяся после взрыва гигантской звезды, источник оптического, рентгеновского, радио- и гамма-излучений, периодические приходящий на Землю в виде импульсов. У пульсаров довольно сильные электромагнитные поля, способные значительно ускорить заряженные частицы, которые по мере своего движения по пространству постепенно рассеиваются на других межзвездных магнитных полях. Также заряженные частицы могут получить дополнительное ускорение за счет межзвездного газа и частиц солнечного ветра. Интересно, что потоки солнечного ветра могут создать и препятствия для проникновения ГКЛ. Было отмечено, что галактические лучи меняются с числом Вольфа в противофазе: потоки ГКЛ минимальные в максимуме солнечной активности, так как межпланетная среда сильно возмущена.

Механизм задержки вторичных частиц в магнитосфере Земли будет рассмотрен в отдельном разделе. Отметим отдельно определение частиц альbedo — это так называемые отраженные от атмосферы нашей планеты вторичные частицы, обеспечивающие радиационный пояс Земли электронами и протонами с высокой энергией.

В солнечных вспышках образуются высокоэнергичные частицы — протоны, электроны и ядра. Эти частицы называют солнечными космическими лучами (СКЛ), и они представляют высокую радиационную опасность. При достижении околоземного пространства СКЛ ослабевают за счет магнитного поля, однако в высоких широтах, особенно в зонах полярных шапок, силовые линии открыты, и потоки протонов практически такие же, как и вне магнитосферы нашей планеты. В результате взаимодействия протонов с

ядрами атмосферы Земли создаются вторичные частицы — мюоны, электроны, фотоны, позитроны, протоны, нейтроны, пионы и т.д. Образованные вторичные частицы покрывают большую область и называются атмосферным ливнем. Энергия солнечных космических лучей находится в диапазоне от килоэлектронвольт до гигаэлектронвольт. Рисунок, упрощенно показывающий влияние СКЛ и ГКЛ, показан ниже [12].

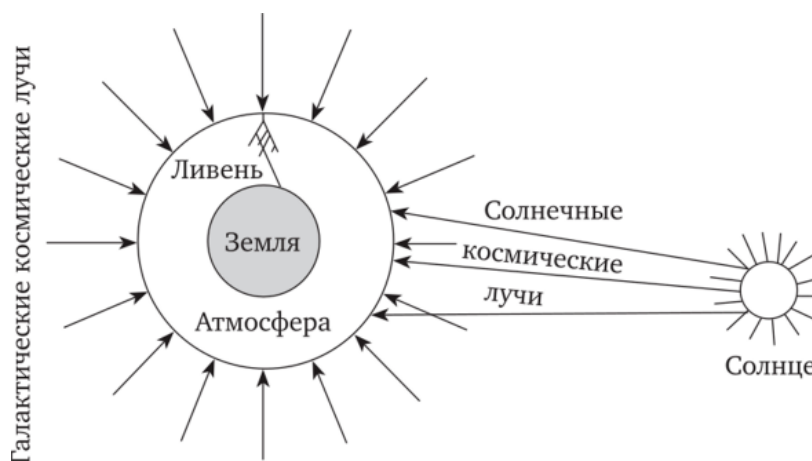


Рисунок 13 – Солнечные космические лучи и галактические космические лучи

Современные измерения солнечных космических лучей проводятся не только на орбитальных станциях с помощью специальной аппаратуры, но и на наземных обсерваториях. Когда солнечная частица, обладая высокой энергией, входит в атмосферу Земли, она взаимодействует с атомами воздуха, порождая уже упомянутые вторичные частицы, которые при столкновении образуют другие частицы, и так далее — образовывается ливень. Такие частицы движутся с огромной скоростью, превышающую скорость света в воздухе, в результате чего возникает так называемый эффект Вавилова — Черенкова в виде свечения. Это свечение регистрируется телескопами, позволяя следить за большими площадями неба. Также среди вторичных частиц образуются нейтроны, которые измеряются наземными

регистраторами и отражают постоянно меняющуюся радиационную среду, характерную для всех высот. Космические лучи несут радиационную опасность для экипажей не только орбитальных станций, но и воздушных судов [3, 9].

1.8 Магнитосфера и радиационный пояс Земли

Магнитосфера — область, окружающая планету или иное намагниченное небесное тело, которая образуется, когда некий поток заряженных частиц (появившийся из-за солнечного ветра, солнечной вспышки, коронального выброса масс, солнечных или галактических лучей и т.п.) отклоняется от своей изначальной траектории из-за магнитного поля этого тела. У Земли есть магнитное поле, а значит, и достаточно сильная магнитосфера. Параметры магнитосферы, такие как форма и размер, определяются силой внутреннего магнитного поля планеты и давлением солнечного ветра.

Геомагнитное поле Земли можно разделить на три составляющие. Главное поле преимущественно состоит из поля, источник которого находится в жидком внешнем ядре планеты. Оно выглядит так, будто Земля — магнитный диполь, и ось направлена приблизительно с севера на юг, с наклоном к оси вращения на 10° . На такой же угол от общепринятых географических полюсов отклонены и геомагнитные полюса — точки, где с поверхностью Земли пересекается ось диполя. Также у Земли имеется магнитный экватор — перпендикулярная магнитной оси плоскость, где магнитная стрелка остается строго горизонтальной. Упрощенная схема главного (или основного) поля приведена на рисунке ниже [8]:

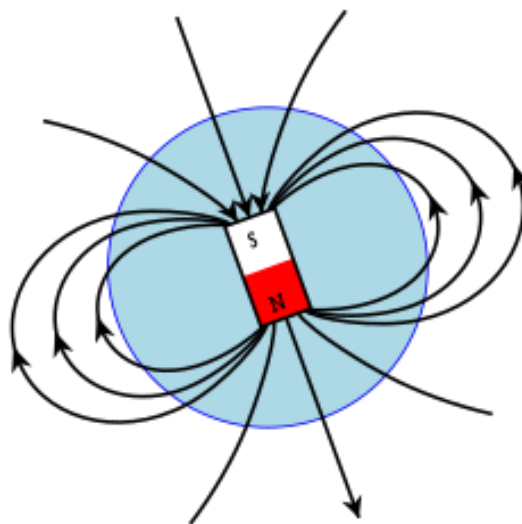


Рисунок 14 – Земля изображена как магнитный диполь с магнитной осью

Вторая составляющая геомагнитного поля Земли — поля мировых аномалий. Несмотря на то, что реальные силовые линии нашей планеты очень близки к дипольным силовым линиям, они все же отличаются из-за местных особенностей, таких как намагниченные породы в земной коре, расположенные вблизи от поверхности. Такие области называют магнитными аномалиями, они бывают положительными и отрицательными в зависимости от совпадения напряженности магнитного поля с главным магнитным полем Земли.

Магнитные аномалии Земли бывают материковые (или континентальные), региональные и локальные — естественно, что они отличаются по своим размерам. У материковых аномалий магнитное поле дипольное, то есть такое же, как и главное, и чаще всего такие отклонения связаны с особенностью поведения потоков внешнего ядра Земли. В северном полушарии распложены две континентальные аномалии — Восточносибирская и Канадская; в южном полушарии также две — Бразильская и Приантарктическая. Региональные аномалии обладают более сложным магнитным полем, связанным с особенностями строения коры, с ее составом и возрастом. В качестве примеров можно перечислить Курскую

магнитную аномалию, Гавайскую, Монгольскую и т.д. Локальные или местные магнитные аномалии занимают от сотни квадратных метров до сотни квадратных километров и встречаются повсеместно. Чаще всего их магнитное поле связано со спецификой состава поверхностных пород земной коры или различными залежами железа. Все аномалии не статичны: они способны перемещаться, ослабевать и усиливаться, возникать и распадаться. На рисунке ниже приведены 4 материковых аномалии и изодинамы — линии равной напряженности магнитного поля [8].

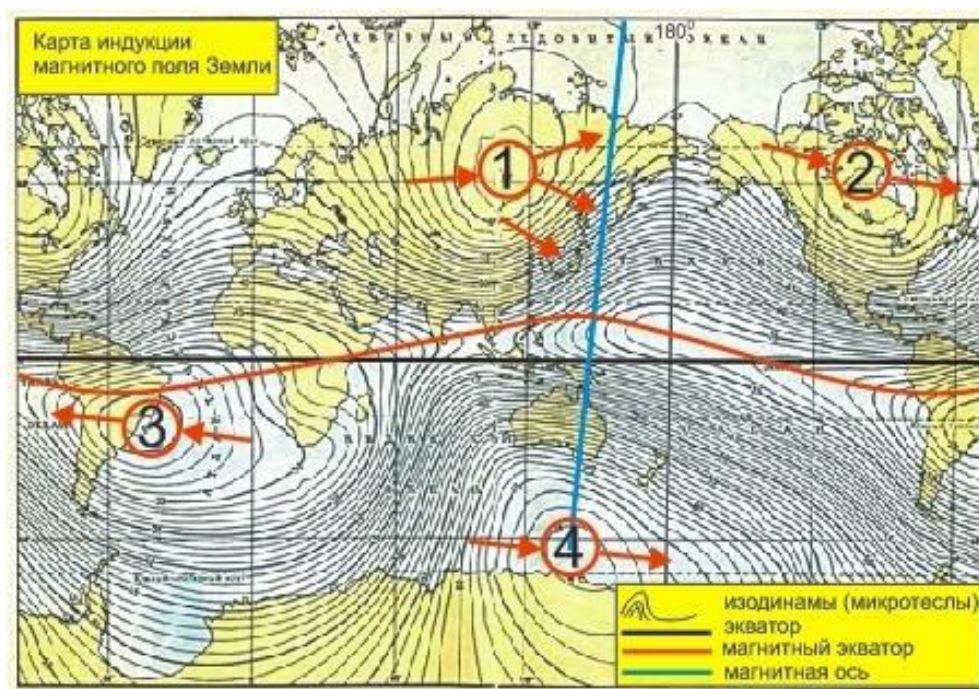


Рисунок 15 – Карта индукции магнитного поля Земли

Особенности реальных силовых линий Земли приводят к тому, что магнитное поле не симметрично, и точки южного и северного магнитных полюсов не антиподальны, то есть не совпадают на «обратной» стороне нашей планеты. Кроме того, точки истинных магнитных полюсов не совпадают с геомагнитными и лежат под поверхностью Земли, из чего можно сделать вывод, что магнитная ось не проходит через центр ядра планеты. Также стоит отметить, что точки полюсов постоянно смещаются.

Третья составляющая — внешнее магнитное поле Земли, и главным образом зависит от внешних источников влияния. Часть магнитосферы, находящуюся выше ионосферы, называют плазмосферой, так как в данном слое молекулы ионизированы настолько, что формируют плазму низкой температуры. Плазма Земли удерживается ее магнитным полем, однако ее форма сильно искажается из-за влияния солнечного ветра, что будет показано на рисунке ниже. Магнитосфера отделяется магнитопаузой от космического пространства.

Также особый интерес вызывает ударная волна, изображенная на рисунке 16. Ударная волна возникает, когда магнитосфера вступает во взаимодействие с солнечным ветром: его скорость резко падает по мере приближения к магнитопаузе со сверхзвуковой до дозвуковой. Таким образом ударная волна является самым внешним слоем магнитосферы Земли [8].

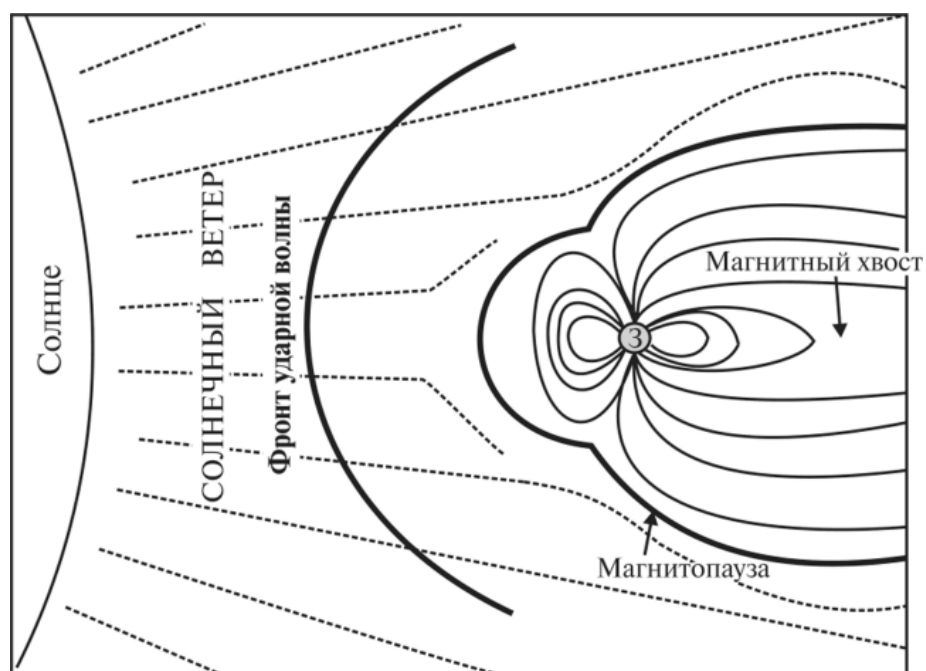


Рисунок 16 – Деформация магнитного поля Земли из-за солнечного ветра

Магнитосфера Земли из-за специфичности силовых линий способна создать «ловушку» для высокозаряженных частиц и в результате накапливает

протоны и электроны. Область, в которой частицы удерживаются и постепенно накапливаются, называется радиационным поясом. На самом деле в любом дипольном поле существуют области, в которые частицы с кинетической энергией меньшей некой критической отметки не могут проникнуть, а частицы с достаточной кинетической энергией, уже расположенные в этой зоне, не могут покинуть. Такие области называются зонами захвата. Существует внутренний радиационный пояс и внешний. Внутренний расположен на высоте 4 тысяч км и состоит из протонов, внешний же состоит из электронов и находится на высоте 17 тысяч км. Нижняя граница радиационного пояса различается в зависимости от долготы из-за наклона магнитной оси к оси вращения Земли и в зависимости от широты из-за разной высоты силовых линий.

Впервые о наличии радиационного пояса было доказано в 1958 году американским ученым Ван Алленом при анализе собранных спутником «Explorer-I» данных, так как космический аппарат предоставил записи о переменчивом уровне радиации при облете планеты вокруг орбиты. Магнитное поле Земли действует на заряженную частицу по закону Лоренца, заставляя электроны и протоны перемещаться из северного в южное полушарие, одновременно при этом совершая круг над планетой по азимуту.

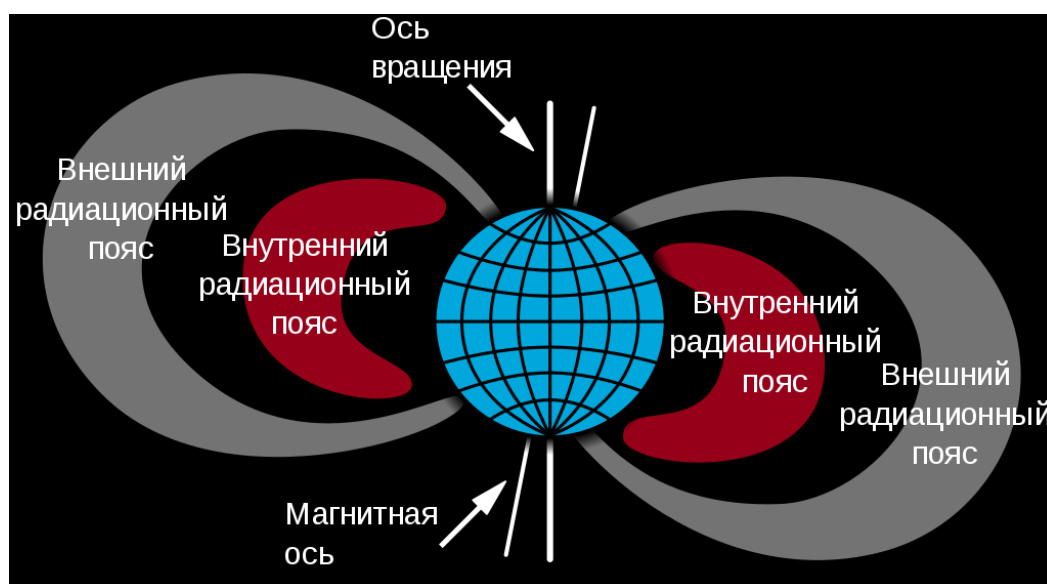


Рисунок 17 – Радиационный пояс Земли

1.9 Геомагнитные бури и суббури

Магнитосфера защищает Землю от вторжения космических частиц, однако по мере удаления от планеты и в хвосте напряженность силовых линий ослабевает. Заряженные частицы попадают в радиационный пояс Земли, вызывая авроральные токи и полярные сияния. Чаще всего это происходит во время магнитных бурь. Возмущение геомагнитного поля Земли, занимающее по времени от пары часов до нескольких дней, и является геомагнитной бурей. Это важный элемент космической погоды.

Геомагнитные бури имеют две фазы развития: фаза нарастания возмущения занимает около 7 часов и также называется главной фазой, фаза возвращения геомагнитного поля к исходному состоянию — или фаза восстановления — около 3 дней. Существует несколько индексов для характеристики интенсивности геомагнитных бурь. Наиболее распространенные — индексы Dst, Kp и Ap. О них подробно будет рассказано в следующем разделе [9,12].

Частота возникновения геомагнитных бурь напрямую зависит от цикла солнечной активности. Очевидно, что максимум геомагнитных возмущений будет приходиться на максимум солнечной активности. Самой мощной геомагнитной бурей считается событие Кэррингтона, произошедшее в 1859 году. Ученые до сих пор спорят по поводу точности Dst-индекса для этой бури, ее числовое значение варьируется от -850 нТл до -1760 нТл. Также из наиболее сильных магнитных бурь можно отметить события сентября 1957 года, февраля 1958 года и 20 ноября 2003 года.

Начиная с исследований английского астронома Кэррингтона долгое время считалось, что главным источником возникновения геомагнитных бурь являются солнечные вспышки. После 1980-х годов и стремительного развития космонавтики ученым стали доступны новые средства наблюдения за активностью Солнца, что привело к открытию корональных выбросов масс. В

настоящее время считается, что основная причина возмущений магнитосферы — это солнечный ветер. Умеренные по своей силе магнитные бури наблюдаются в периоды минимума активности на поверхности Солнца и чаще всего имеют интервал в 27 дней, то есть по времени вращения светила, и называются рекуррентными. Рекуррентные бури рождаются из корональной дыры, которая является источником быстрого солнечного ветра. При взаимодействии быстрого солнечного ветра и медленного возникает область сжатия (CIR — Corotating Interaction Region). Из-за изменения движения потока плазмы в CIR возникает некая геоэффективная компонента, способствующая развитию геомагнитных бурь и суббурь. Как уже было отмечено ранее, корональные дыры существуют на Солнце от пары дней до пары месяцев. В зависимости от источника энергии, геомагнитные бури различаются свойствами и характерами развития.

Для прогноза геомагнитных бурь используется комплексный подход наземной и спутниковой аппаратуры. Из приборов можно перечислить магнитометры, расположенные в полярных и экваториальных зонах, радиолокаторы, а также специальные радары, измеряющие некогерентное и когерентное рассеяния. О них будет рассказано подробнее в разделе «Ионосфера». На борту космических аппаратов тоже есть магнитометры. Помимо них для имеются различные электрические системы и датчики для измерения плазмы, поступающей на околоземную орбиту, детекторы радиоактивных частиц, в основе которых счетчик Гейгера, сцинтилляционные детекторы и прочие, более современные приборы.

Прогнозы разделяются по своей заблаговременности. Существует 27-45 суточный прогноз: это текущие наблюдения за состоянием солнечной поверхности, чаще всего связанные с возникновением рекуррентных магнитных бурь. При составлении 7-суточного прогноза также используются текущие наблюдения, но особое внимание уделяется перемещению и взаимодействию активных областей вблизи центрального меридиана. Наиболее точными считаются двухсуточные и часовые прогнозы, в то время

как остальные имеют лишь информационно-описательный характер из-за своей низкой точности. При двухдневном прогнозе особое влияние уделяется не только активным областям, но и расчетам траектории распространения солнечного ветра, который обычно достигает околоземной атмосферы максимум за пять суток, и СКЛ, которые также оказываются вблизи нашей планеты за несколько часов [15].

Одночасовой прогноз в большей степени зависит не от наземных наблюдений, а от космической аппаратуры. Прежде всего он основывается на измерениях параметров плазмы, содержащейся в солнечном ветре. Надежность такого прогноза около 95%, тогда как у двухсуточного до 50%. Негативные последствия геомагнитных бурь постоянно перечислялись в течении исследовательской работы. Это и нарушения в стабильности работы космических летательных аппаратов, которые могут привести к серьезной поломке спутника; и серьезные неполадки в наземных энергетических системах; и влияние на спутниковую и навигационную связь; и опасность для здоровья космонавтов, а также для пассажиров и членов летных экипажей воздушных судов [15].

Также существует гипотеза о влиянии магнитных бурь на физическое здоровье человека. Впервые данное суждение возникло в работах российского ученого и биофизика Чижевского на основе исследований частоты возникновения травматизма, несчастных случаев и обращений в больницы. В настоящее время отсутствует единое мнение по этому поводу. Геологическая служба США считает, что риск для здоровья оправдан только при полетах на высоких эшелонах или на орбите в связи с повышением естественного радиационного облучения Земли. Влиянием активности Солнца на земные организмы изучается разделом биофизики под названием гелиобиология. Также феномен негативной реакции человека на изменения не только наземной погоды, но и космической, называется метеозависимостью.

Суббури отличаются от магнитных бурь локальностью: суббури проявляются как усиление полярных сияний, по интенсивности не уступают

масштабным геомагнитным явлениям и могут быть даже сильнее, но происходят только с неосвященной стороны Земли. Их механика возникновения очень схожа. Хвостовой ток силовых линий магнитного поля нашей планеты замыкается через ионосферный слой в ночной стороне после сильного притока энергии, поступившего из околоземного пространства. Этот вновь образовавшийся ток называется «электроджетом» и изменяет наземное магнитное поле до 1000 нТл. Суббури развиваются по всем верхним слоям атмосферы. Длительность суббурь обычно не превышает один час.

У суббурь есть свои индексы, также основанные на горизонтальной составляющей магнитного поля Н-компоненте. Это AE, AL, AU и AO-индексы, предназначенные специально для широт с наиболее частыми возникновениями полярных сияний — так называемые субавроральные и авроральные широты. Обычно используются данные 12 геофизических станций, среди которых немало российских: Абиску (Швеция), Диксон, мыс Челюскин, Тикси, Певек (Россия), Барроу, Саникилуак, Фэрбанк (Аляска), Йеллоунайф (Канада), Форт-Черчилль (США), Нарсарсуак (Гренландия), Мосфедльсбайр (Исландия). Часто для вычисления индексов используются данные двух-трех обсерваторий.

AU (auroral upper) и AL (auroral low) — индексы, соответствующие максимальному положительному и отрицательному отклонениям Н-компоненты от спокойного состояния. Стоит заметить, что отрицательные отклонения характерны для утренних и ночных часов, а положительные — для вечерних. AE-индекс вычисляется как сумма двух предыдущих индексов, то есть показывает суммарные колебания около спокойного состояния Н-компоненты и, соответственно, является показателем интенсивности возмущения магнитного поля. AO-индекс рассчитывается по формуле:

$$AO = \frac{(AU+AL)}{2} \quad (2)$$

и представляет собой некую срединную точку между значениями. Индексы измеряются в гаммах и официально публикуются в Мировом центре данных геомагнетической обсерватории Киото [9, 15].

1.10 Индексы геомагнитной активности

Dst-индексы описывают напряженность магнитного поля нашей планеты, имеют отрицательное значение и измеряются в наноТеслах. Нулевое значение соответствует спокойному магнитному полю. Данные индексы можно сопоставить с различными геофизическими и солнечными параметрами. Для вычисления используется сеть наземных международных станций: Херманус (ЮАР), Какиока (Япония), Гонолулу (Гавайи, США), Сан-Хуан (Пуэрто-Рико), Алибаг (Индия). Ниже приведен рисунок с сетью Dst-станций. Нетрудно заметить, что станции равномерно распределены по долготе, кроме индийской — она относительно недавно была введена в эксплуатацию.

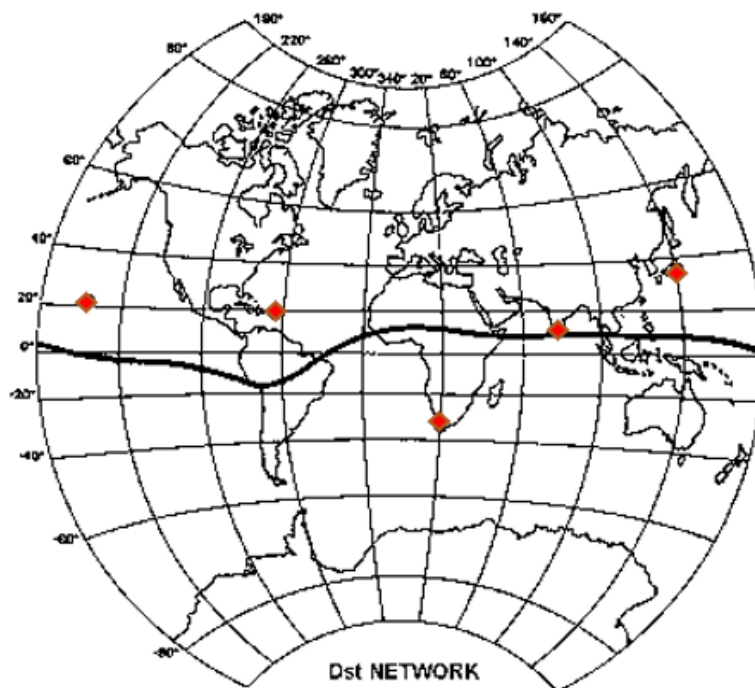


Рисунок 18 – Сеть геофизических обсерваторий, вычисляющих индекс

При вычислении Dst используется горизонтальная компонента Н — один из векторов геомагнитного поля Земли. Еще в начале XX века было доказано, что во время геомагнитных бурь Н-компонента понижается (чем быстрее, тем сильнее буря) и затем постепенно возвращается к своему исходному уровню во время фазы восстановления, поэтому ее расчеты так важны. Для каждой обсерватории характерна своя Н-компонента, так как учитываются свои региональные особенности и вековые вариации геомагнитного поля, а также локальные аномалии.

Вычислительный процесс происходит следующим образом: сперва определяется базовая линия Н-компоненты. Выбираются самые спокойные пять дней для каждого месяца, одинаковые по сети обсерваториям, раскладываются во временной ряд по методу наименьших квадратов с использованием всех значений необходимого года. То есть [3,12]:

$$H_{base}(t) = A + B \times t + C \times t^2 + \dots, \quad (3)$$

Где: t — время в годах.

Однако при таком полиномиальном разложении будет резкий скачок между последним значением Н-компоненты текущего года и первой Н-компоненты последующего года, так как вычисления производятся по двум совершенно разным полиномам. В таком случае дополнительно используют данные Н-компоненты предыдущего года, что искусственно минимизирует погрешность.

Базовую линию $H_{base}(t)$ вычисляют для каждого часа необходимого года и вычитают из наблюдаемой компоненты $H_{obs}(t)$ и полученные данные по каждой геофизической обсерватории используют для дальнейших вычислений. То есть:

$$\Delta H(T) = H_{obs}(T) - H_{base}(T) \quad (4)$$

Затем решают вопрос устранения спокойной солнечно-суточной Sq-вариации — это изменение параметров магнитного поля Земли с периодом, равным одним солнечным суткам. Для каждого месяца данная величина вычисляется с использованием H-компоненты. Чтобы вычислить среднюю Sq для любого дня используют другие пять дней, которые перекрываются с пятью спокойными днями, принятыми по сети обсерваторий. Получается 12 среднемесячных значений Sq, и для определения Dst индекса солнечно-суточную вариацию раскладывают в двойной ряд Фурье:

$$S_q(t, s) = \sum_m \sum_n A_{mn}(mt + \alpha_m) \times \cos(ns + \beta_m), \quad (5)$$

Где: t - местное время;

s - номер месяца.

Таким образом получают Sq(T) для любого момента времени в течении года по каждой обсерватории. Далее вычисляют возмущенную D(T) по каждой станции:

$$D(T) = \Delta H(T) - S_q(T) \quad (6)$$

и усредняют по пяти международным обсерваториям с использованием дипольного экватора геомагнитного поля Земли:

$$D_{st}(T) = \frac{\sum_{i=1}^4 D_i(T)}{\sum_{i=1}^4 \cos \varphi_i}, \quad (7)$$

Где: φ_i - дипольная широта геофизической обсерватории.

Получается, что итоговый почасовой экваториальный Dst-индекс является характеристикой возмущенного поля вблизи дипольного экватора Земли. Как уже замечалось ранее, практически всегда индекс отрицательный, что связано с кольцевым током магнитосферы. Умеренной геомагнитной бурей считается при Dst от -50 нТл до -100 нТл, сильной — до -200 нТл, экстремальной при еще более высоких значениях. Обычно в спокойные дни индекс Dst равен ± 20 нТл [15].

Еще один индекс, используемый для характеристики степени возмущения магнитного поля, — К-индекс. Он характеризует среднее отклонение планетарного магнитного поля от нормального в течении трех часов и исчисляется в условных единицах от 1 (спокойное состояние магнитосферы) до 10. Возмущение от 5 баллов уже считается геомагнитной бурей. Впервые данный индекс был введен в научную литературу в 1939 году немецким геофизиком и математиком Бартельсом.

К-индекс вычисляется в тех геофизических станциях или обсерваториях, где установлен магнитометр. Прибор измеряет горизонтальные компоненты магнитного поля в нТл. Так как индекс считается за каждые три часа, всего в течении суток получается восемь временных отрезков. Для вычислений степени отклонения планетарного магнитного поля от нормального сперва вычисляется средний показатель спокойного магнитного поля, затем определяется максимальные отклонения (положительные и отрицательные) в любое время из этих трехчасовых интервалов, суммируются и таким образом получается общее максимальное отклонение.

Шкала данного индекса квазилогарифмическая: то есть для индекса $K = 0$ имеется некий верхний предел, для его вычисления нижний предел $K = 9$ умножается на 0,01. Верхние пределы индексов K от 1 до 7 вычисляются с помощью умножения вычисленного верхнего предела $K = 0$ на 2, 4, 8... 64. Для того, чтобы потребителям было удобно, каждая геофизическая обсерватория, которая считает К-индекс, публикует свой нижний предел для $K = 9$. Помимо этого, все обсерватории имеют свои конкретные таблицы К-индекса с корректирующими множителями. К-индекс сильно зависит от геошироты станции: к примеру, при $K = 9$ в Гавайях соответствуют колебаниям в 300 нТл, в Германии 500 нТл, а в Гренландии — 1500 нТл [15].

Также существует Кр-индекс — общий планетарный, который не зависит от геофизической широты местности. Он является официальным, вычисляется на основе измерений двух горизонтальных компонент магнитного поля Земли с тринадцати станций, расположенных в средних

широтах. Используются следующие станции: Леруик, Эскаделмур (Шотландия), Минуок, Оттава (Канада), Ситка (Аляска), Уппсала (Швеция), Брорфельде (Дания), Хартленд (Англия), Вингст, Нимегк (Германия), Фредериксбург (США), Канберра (Австралия), Айрюэлл (Новая Зеландия) [15].

Есть Кр-индекс предварительный, окончательный и прогнозируемый. Предварительный планетарный индекс рассчитывается в Центре прогнозирования космической погоды при Национальном управлении океанических и атмосферных исследований с использованием данных наземных магнетометров, передающих измерения каждую минуту. Расчет предварительного Кр-индекса приведен выше и представляет собой не прогноз текущих условий, а всего лишь значение за определенный период.

Окончательный Кр-индекс рассчитывается в Потсдамском центре имени Гельмгольца, корректируется в течении пары недель и является официальным значением. Окончательный Кр-индекс обновляется дважды в месяц и используется для научных целей. Он лишь немногим отличается от предварительного индекса. Его особенность в том, что он имеет 28 значений, так как выражается в шкале третей.

Прогнозируемый Кр-индекс указывается на различных сайтах с прогнозами. Очевидно, что по нему невозможно определить активность магнитного поля и такие параметры полярного сияния как яркость, цветность и продолжительность.

В 1999 году NOAA ввело шкалу силы геомагнитных бурь, основанную на Кр-индексах. Она очень удобная для пользователей, в том числе авиационных, тем, что вместе с интенсивностью бури приведены возможные последствия, интенсивность и смещение полярных сияний и прочие параметры. Кроме того, шкала помогает понять не только состояние магнитосферы на текущий период, но и сделать прогноз. Шкала приведена в качестве таблицы ниже [15]:

Таблица 2 – Шкала интенсивности геомагнитных бурь

| G | Интенсивность магнитной бури | Последствия на различные системы | Kp |
|----|------------------------------|--|------|
| G5 | Экстремальная | <p>Энергетические системы: масштабные проблемы с регулированием напряжения систем, неполадки в защитных системах; некоторые системы могут работать некорректно или отключаться; возможно повреждение трансформаторов.</p> <p>Функционирование КА: на спутниках появляется обширный поверхностный заряд; масштабные проблемы с ориентацией спутника в пространстве, с линией связи и отслеживанием.</p> <p>Другие системы: токи в трубопроводах достигают значений до сотен ампер; практически полная блокировка КВ-радиосвязи во многих районах продолжительностью до нескольких дней; спутниковая навигация ухудшается на несколько дней; низкочастотная радионавигация может отсутствовать в течении нескольких часов; полярные сияния могут наблюдаться в экваториальных широтах.</p> | Kp=9 |
| G4 | Очень сильная | <p>Энергетические системы: напряжение в электросетях может быть нестабильно; защитные системы работают некорректно и могут отключаться; возможны возникновения повреждений предохранителей и некоторых обширных участков энергосистем.</p> <p>Функционирование КА: возникновение опасного поверхностного заряда на поверхности спутников; проблемы с отслеживанием положения спутника и со спутниковой связью.</p> <p>Другие системы: индуцированные токи оказывают сильное влияние на предохранительные системы; нарушение в распространении КВ-радиосигналов; спутниковая и низкочастотная связь может ухудшаться на несколько часов; ухудшение в</p> | Kp=8 |

| | | | |
|----|-----------|--|------|
| | | низкочастотной радионавигации; полярные сияния могут наблюдаться в тропических широтах. | |
| G3 | Сильная | <p>Энергетические системы: может потребоваться коррекция напряжения системы; ложные тревоги в некоторых защитных устройствах; неполадки в работе масляных трансформаторов.</p> <p>Функционирование КА: возможность возникновения поверхностного заряда на отдельных компонентах спутников; возрастание лобового сопротивления спутников, находящихся на низкой орбите; может потребоваться корректировка в ориентации.</p> <p>Другие системы: могут возникнуть проблемы с низкочастотной и спутниковой радионавигацией; прерывание КВ радиосигнала; полярные сияния могут наблюдаться и в средних широтах.</p> | Kp=7 |
| G2 | Умеренная | <p>Энергетические системы: возможны воздействия на системы в высоких широтах; длительная буря может привести к повреждению сетей; возможно возникновение аварийного сигнала и скачков напряжения.</p> <p>Функционирование КА: наземным контрольным службам может понадобиться корректировка в работе; есть влияние на прогноз орбиты спутников.</p> <p>Другие системы: проблемы с КВ-связью в высоких широтах; полярные сияния в широтах до 50-55°.</p> | Kp=6 |
| G1 | Слабая | <p>Энергетические системы: слабые колебания.</p> <p>Функционирование КА: слабое воздействие.</p> <p>Другие системы: полярные сияния в высоких широтах; есть некоторые изменения в привычной миграции животных.</p> | Kp=5 |

Ар-индекс также вычисляется на основе Кр-индекса и векторных составляющих магнитного поля D и H в течении трех часов с использованием данных среднеширотных станций. Данный индекс также называют

планетарной амплитудой магнитосферы. Его значения колеблются от 0 до 400 нТл, это линейно преобразованные числа Кр-индекса. Ар индекс считается путем осреднения восьми полученных за день значений. Чем больше геомагнитная активность за день, тем выше значение Ар [15].

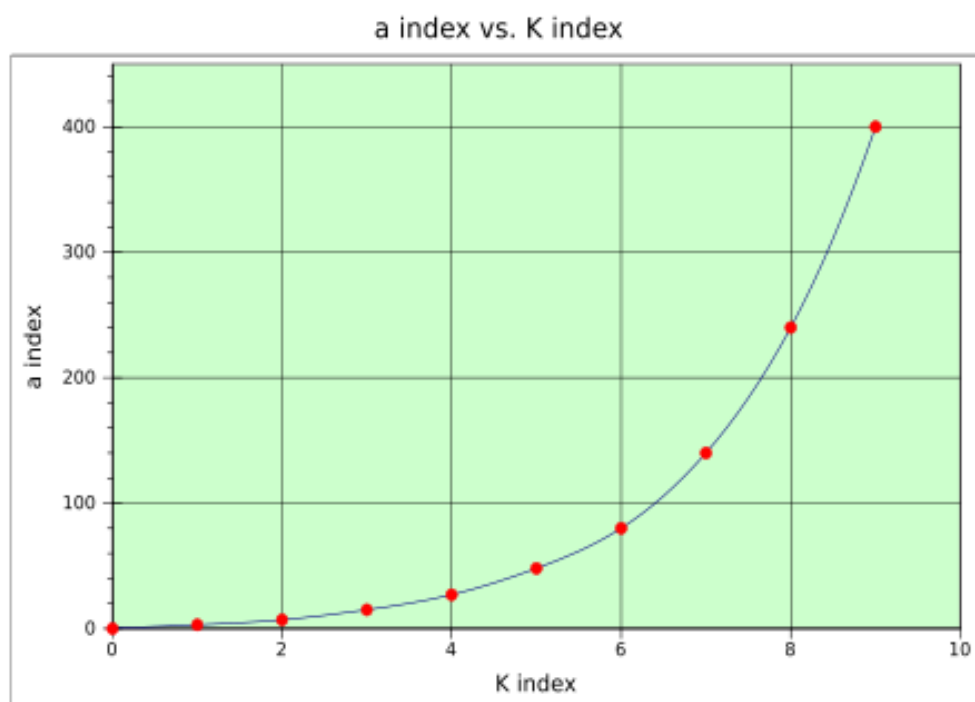


Рисунок 19 – Линейное преобразование индекса К

1.11 Ионосфера

Ионосферой называется один из слоев верхней атмосферы, где велика концентрация электронов и свободных ионов, ионизированный рентгеновским, ультрафиолетовым излучением, а также под влиянием солнечных и космических галактических лучей. Частицы удерживаются здесь под действием магнитного поля и гравитации. Большую роль для этого слоя играет солнечное излучение. Состав ионосферы Земли — это смесь из молекул кислорода и азота, нейтральных атомов и плазмы из отрицательных и положительных частиц. Моделирование ионосферы проводится с помощью таких параметров, как ионный и электронный состав, скорость движения

заряженных частиц, температура ионов и электронов и др. Для спутникового позиционирования особенно важно содержание электронов в ионосфере, так как именно количество частиц влияет на качество распространения радиоволн.

История открытия ионосферы и ее исследования тесно связано с радиосвязью. В 1901-1902 годах впервые были осуществлены трансатлантические радиопередачи, и в этих же годах английский ученый-самоучка Хэвисайд и американский инженер Кеннели независимо друг от друга заявили о существовании в атмосфере некоего ионизированного слоя. По их предположениям радиоволны могли распространяться вокруг всей нашей планеты, а этот слой был способен отражать радиосигнал. В честь них слой назвали слоем Хэвисайда-Кеннели и лишь потом ионосферой. В дальнейшем исследования продолжались, устанавливались точные границы ионосферы, ее плотность и высота — вместе с этим разрабатывались теории о распространении коротких и длинных радиоволн. С развитием космонавтики ионосфера изучалась в том числе с помощью спутников.

В 1920-х годов советский радиотехник-ученый Шулейкин предположил, что у ионосферы существует два слоя, где концентрация ионов максимальна — на высотах 100 и 200 км. Более того, ионосфера неоднородна, отличается по высоте и зависит не только от времени года, но и от времени суток, а также от широты и долготы местности, и цикла солнечной активности. В зависимости от концентрации заряженных частиц ионосферу разделяют на несколько слоев. На рисунке ниже представлена схема [3,5].

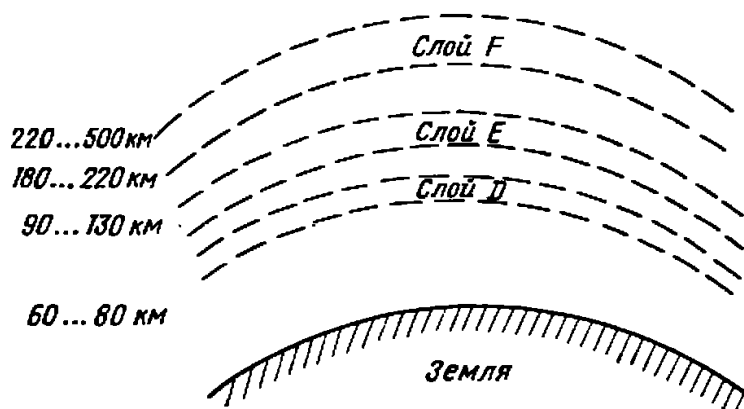


Рисунок 20 – Ионосфера, разделенная по слоям

Слой D расположен на высоте 60-90 км. Это область слабой ионизации, где концентрация заряженных частиц не превышает значений $10^2 - 10^3 \text{ см}^{-3}$. Основные источники ионизации для этого слоя — это излучение Солнца в рентгеновском диапазоне, а также в наименьшей степени метеориты, СКЛ, ГКЛ и, при магнитных бурях, высокоэнергичные частицы, проникающие в слой из магнитосферы. Слой D наиболее подвержен суточным колебаниям степени ионизации, так как ионизации резко снижается в ночное время. Стоит отметить, что в полярных широтах ионизация именно этого слоя может достигать высочайшего уровня, образуя так называемые поглощения полярной шапки (ППШ), в которых особенно часто пропадает КВ-сигнал [5].

Слой E расположен на высоте от 90 до 130 км, концентрация заряженных частиц достигает значений 10^5 см^{-3} . Слой E, в свою очередь, делится на регулярную и нерегулярную области. Регулярная область также зависит от времени суток, так как основной источник ионизации — это коротковолновое и рентгеновское излучение Солнца, а также и длинноволновый ультрафиолет. Именно поэтому в слое наблюдается ярко выраженный рост ионизации в дневное время и быстрое снижение концентрации электронов и плотности ионов в ночное, вплоть до 10^3 см^{-3} , как для слоя D. Кроме того, стоит немного забежать вперед и отметить, что процессу резкого снижения ионизации в слое E противодействует диффузия зарядов из слоя F, так как там концентрация ионов намного выше и есть свои источники ночной ионизации, которые мы рассмотрим ниже. Что касается нерегулярной области, то она находится на высотах 100-120 км, часто называется спорадической и обозначается E_s . Область E_s тонкая, до 1 км, и отличается высокой плотностью концентрации электронов, имеет большие размеры по горизонтали и характерна облаками повышенной ионизации. Как и весь слой E, имеющий важную роль для распространения средних и коротких радиоволн, область E_s может отражать радиоволны частотой до 50 МГц. Слой E иногда называют слоем Хэвисайда-Кеннели в честь его первооткрывателей [5].

Слой F — самый верхний слой ионосферы, расположенный выше 130 км, и состоящий из атомов кислорода, ионов гелия и протонов водорода, которые возникают в результате облучения солнечной радиации. Именно в слое F наблюдается максимум концентрации ионов, примерно на высотах от 250 до 400 км, однако из-за диффузии атмосферы заряженные частицы не статичны и перемещаются между слоями вверх и вниз. Слой F также делится на два подслоя — F_1 и F_2 . На слой F колоссальное влияние оказывает ультрафиолетовое излучение Солнца, в результате чего в дневное время образуется область F_1 , расположенная на высотах от 150 до 200 км. В ночное же время большинство заряженных частиц находятся в слое F_2 , то есть на высотах от 300 до 400 км. Именно благодаря слою F радиоволны могут распространяться на большие расстояния и, не смотря на зависимость от солнечной активности, эта способность стабильна [5].

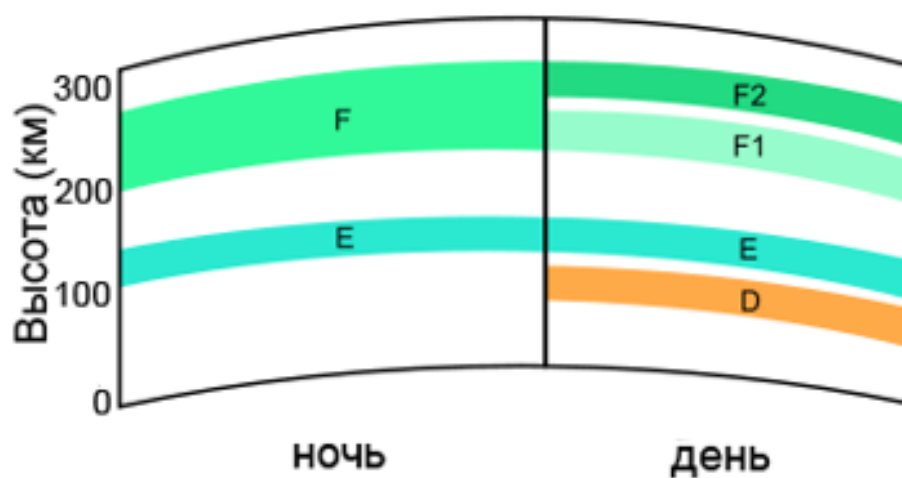


Рисунок 21 – Зависимость состояния ионосферы от времени суток

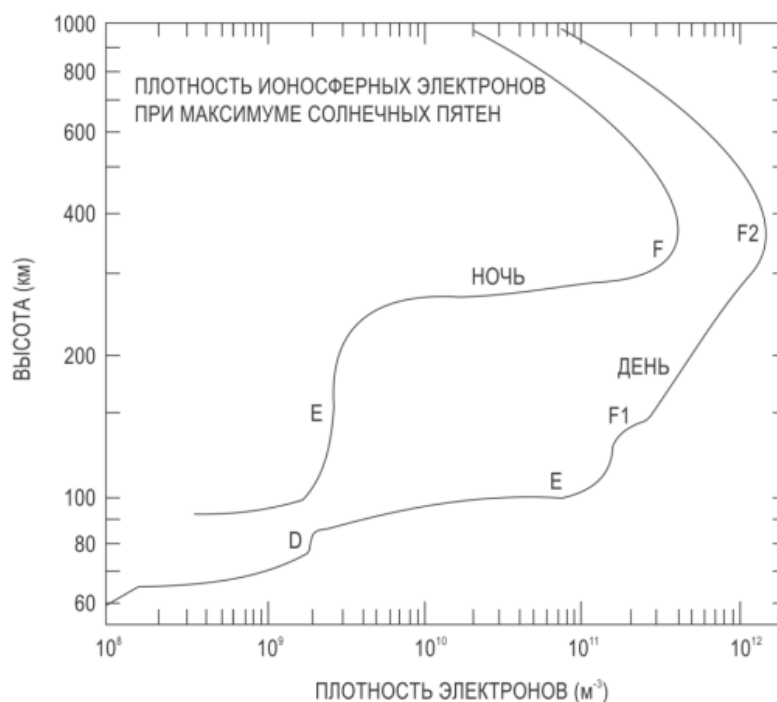


Рисунок 22 – Зависимость плотности электронов в ионосфере в зависимости от времени суток

Прогностические модели состояния ионосферы строятся как функция зависимости от географического положения, времени года и суток, высоты и солнечной активности. Также моделирование проводится на основе состояния плазмы, распложенной в ионосфере. С точки зрения авиационной метеорологии, наиболее важна концентрация электронов, так как от нее напрямую зависит качество распространения радиоволн. Наиболее известная и распространенная модель — это IRI (International Reference Ionosphere). IRI использует множество измерительной аппаратуры: мощные радары, находящиеся в обсерваториях в Перу, Пуэрто-Рико и в штатах Массачусетс и Арканзас, США; сеть ионозондов; спутниковые ионосферные станции. Модель IRI постоянно совершенствуется с развитием технологий [15].

Существует несколько аномалий, постоянно влияющих на состояние ионосферы. Одна из них называется зимней аномалией и связана с сезонными изменениями концентрации ионов в области F₂, хотя высота этой области зимой ниже на 20-30 км. Природа зимней аномалии до сих не ясна. Считается,

что причина кроется в изменении отношения главных компонент ионосферы — кислорода и азота, а также в скорости рекомбинации заряженных частиц. Получается, что увеличение потерь частиц слишком велико, несмотря на, казалось бы, увеличение их концентрации, которая не успевает восполняться. Зимняя аномалия характерна для северного полушария всегда и для южного, когда активность Солнца низкая.

Также есть экваториальная аномалия, находящаяся в пределах 20° магнитного экватора и связанная с особенностью расположения линий магнитного поля Земли — они горизонтальны. В следствии того, что наша планета вращается, плазма перемещается поперек силовых линий, особенно в нижних слоях ионосферы. В результате образуется так называемый экваториальный фонтан: ионы заметно поднимаются в зоне экватора вместе с нагретым воздухом и образуют слои повышенной концентрации [5].



Рисунок 23 – Силовые линии над магнитным экватором

Экваториальный электроджет — это ток, текущий на восток на дневной стороне в экваториальной зоне ионосферы по очень узкому широтному диапазону, примерно $3-5^\circ$. Данный ток может быть связан с усилением

горизонтальной компоненты H и является следствием поляризации тока на высотах 100-130 км (слой E) [5].

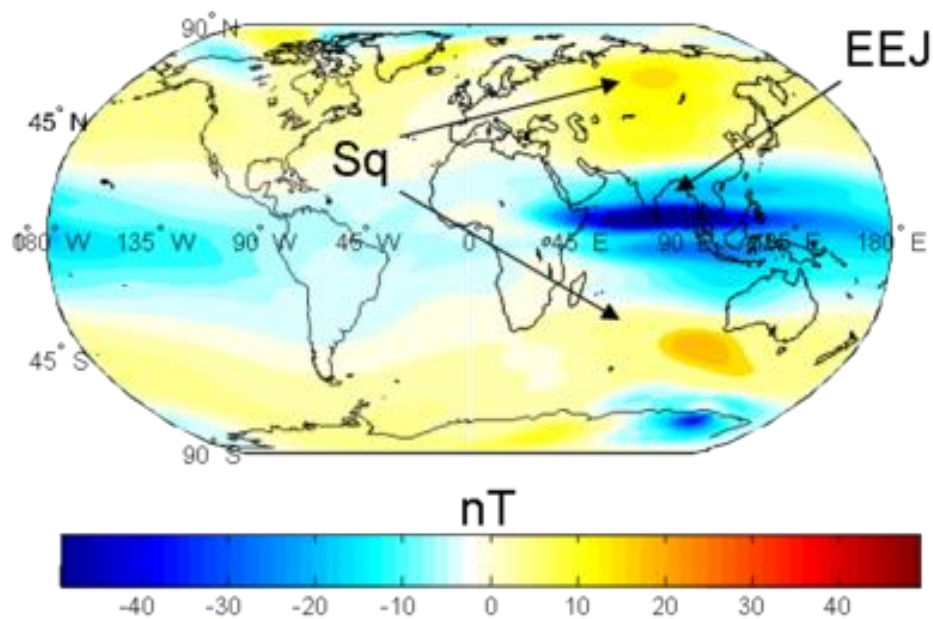


Рисунок 24 – Экваториальный электроджет над Индийским океаном

2. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ПОЛЕТЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

2.1 Магнитные бури в истории человечества

Космическая погода всегда оказывала огромное влияние на все аспекты жизни человека, и с ростом технического прогресса влияние опасных гелиогеофизических явлений (ОГЯ) становится с каждым годом заметнее.

Одним из значимых событий в истории человечества является мощнейшая геомагнитная буря, произошедшая 1 сентября 1859 года — событие Кэррингтона. Буря произошла за несколько месяцев до солнечного максимума десятого солнечного цикла, то есть в период повышенной активности Солнца. По оценкам ученых индекс напряженности магнитного поля Земли Dst варьировался от -800 нТл до -1750 нТл. Скорее всего, причиной данной бури являлся крупный корональный выброс масс, направленный на нашу планету. СМЕ понадобилось около 18 часов, чтобы достичь Земли, тогда как типичное время движения — несколько дней, что свидетельствует о мощности выброса [23].

Утром 1 сентября астрономы-любители из Англии Ходжсон и Кэррингтон провели независимые друг от друга наблюдения, записали данные о солнечной вспышке и прислали свои исследования в научный журнал MNRAS (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society) — к слову, существующий с 1827 года. Позже, в ноябре, они представили рисунки передвижения солнечных пятен на заседании Королевского астрономического общества. Рисунок Кэррингтона представлен ниже, с его помощью можно увидеть начальные точки (A, B) и конец траектории (B, D) [23]:

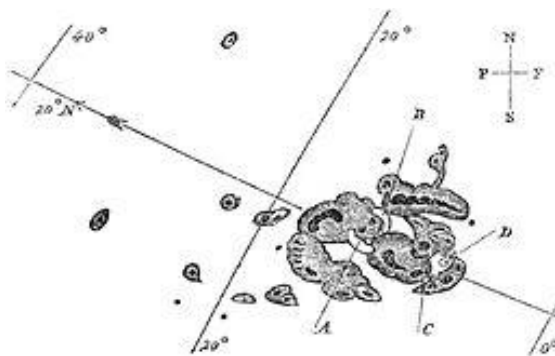


Рисунок 25 – Солнечные пятна 1 сентября 1859 г.

Анализируя данные магнитометра в обсерватории Кью в Шотландии и наблюдавшуюся на следующие сутки геомагнитную бурю, именно Кэррингтон заподозрил взаимосвязь между активностью Солнца и нарушением магнитного поля Земли. Событие Кэррингтона вызвало полярные сияния в нестандартных широтах, то есть в низких — над Карибским морем, Мексикой, Гавайями, Японией, Китаем, Кубой и даже над экваториальной Колумбией. По свидетельствованию людей, над Соединёнными Штатами полярное сияние было такой силы, что успешно заменяло солнечный свет. Кроме того, были и серьезные последствия для инфраструктуры — из-за геомагнитных токов, индуцированных на земной поверхности вследствие флуктуаций магнитного поля, телеграфные столбы на территориях Северной Америки и Европы вышли из строя и выбрасывали искры. Интересно, что некоторые звонки совершались без использования батарей, так как геомагнитных токов было достаточно. Считается, что, произойди событие Кэррингтона в нынешнее время, буря бы вызвала повсеместные перебои в электроснабжении и локальные отключения электроэнергии. Подобные события, повлекшие за собой полярные сияния в южных широтах, а также неполадки в подаче электроэнергии и даже возгорания телеграфных столбов происходили в 1882, 1921, 1938 годах [15,24].

С развитием космонавтики, авиации и авионики влияние геомагнитных бурь стало не только заметнее, но и опаснее. Одним из значимых для

современных технологий событий стали солнечные бури в августе 1972 года. Солнечная вспышка и корональный выброс масс стали следствием огромной и долгоживущей активной области солнечных пятен McMath 11976. 4 августа во время солнечной вспышки рентгеновские датчики, установленные на спутнике Solrad 9, измерили излучение, по шкале NOAA относящее к R5. Рентгеновское излучение генерировалось Солнцем на протяжении 16 часов, гамма-спектр солнечной плазмы впервые был зафиксирован Орбитальной солнечной обсерваторией (OSO-7). Также был установлен своеобразный «рекорд»: корональный выброс массы достиг Земли за 15 часов, скорость солнечного ветра на околоземной орбите превысила 2000 км/с, но точное измерение было невозможно, так как измерительные приборы на космических аппаратах зашкалили. Также по шкале солнечной радиации NOAA поток высокоэнергичных ионов достиг S5 [25].

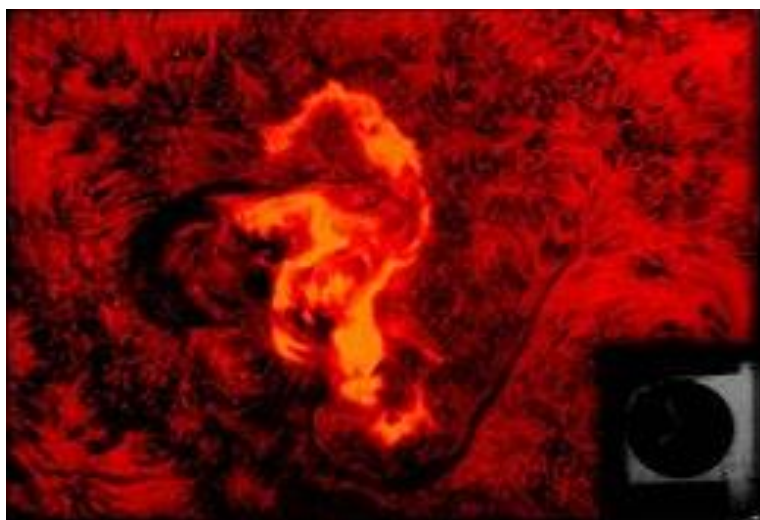


Рисунок 26 – Солнечная вспышка, — «вспышка морского конька», — произошедшая 7 августа в рамках солнечного события 1972 года, зафиксированная Солнечной обсерваторией Big Bear (BBSO)

Несмотря на то, что индекс Dst был относительно невысоким (около - 125 нТл), показатели магнитометров, установленных в геофизических обсерваториях в штате Колорадо, Гонолулу и Гавайях превысили допустимые

значения, многие индексы геомагнитной активности достигли максимума или близких к максимальному показателей. Так, например, индекс Кр был равен 9, что по шкале NOAA соответствует G5. Было доказано, что магнитосфера деформировалась, магнитопауза и плазмопауза сжались примерно до двух третей размеров стандартной магнитосферы, то есть динамическое давление на околоземное пространство солнечного ветра было колоссальным [25].

Солнечные вспышки августа 1972 года имели большие последствия. Так как магнитосфера сильно сжалась, многие спутники оказались за ее пределами, то есть в неблагоприятных условиях космической погоды и под влиянием высокозаряженных солнечных частиц. Космические аппараты испытали такой износ за короткий период времени, какой должны были почувствовать в течении двух лет; некоторые космические миссии были досрочно окончены из-за сбоев питания и электроники, измерительные приборы были повреждены (например, военные космические аппараты DSCS II и DMSP). 4 и 5 августа произошли яркие полярные сияния, достигшие побережья Испании, причем их цвет был ярко-красным, что является редким явлением, связанным только с экстремально сильными геомагнитными событиями. Отключения коротковолновой радиосвязи произошли по всей освещенной стороне нашей планеты, геомагнитные индуцированные токи вызвали серьезные нарушения в энергетических и электронных системах, вплоть до отключения или срабатывания аварийных сигналов по территориям Канады и США, локально — над Японией, Филиппинах и Бразилией, что в некоторых степени было связано с аномалиями ионосферы. Кроме того, спутники ВВС США, предназначенные для обнаружения ядерной детонации, ошибочно сработали во время геошторма, а также сработала самопроизвольная детонация мин неподалеку от берегов Северного Вьетнама. По счастливой случайности буря произошла в тот момент, когда миссии спутниковых кораблей «Аполлон» не проводились в августе: в противном случае экипаж подвергся бы огромной дозе радиации, в случае выхода в открытый космос даже смертельной. Сильная доза радиации также была

угрозой и для полетов воздушных судов на высоких эшелонах и вблизи полюсов. Геомагнитная буря августа 1972 года имеет большое значение, так как именно ее последствия, а в дальнейшем изучение полученных данных, вынудили общество серьезней относиться к опасным геофизическим явлениям космической погоды и выделять финансирование на ее мониторинг и исследования [25].

Геомагнитная буря марта 1989 года произошла из-за сильной вспышки класса X15 и, как следствие, корональных выбросов масс. Полярные сияния наблюдались на широтах Техаса и Флориды, произошли крупномасштабные отключения связи и помехи в коротковолновой радиосвязи, многие спутники, размещенные на полярных орбитах, потеряли связь с Землей на несколько часов, в том числе метеорологический спутник серии GOES, были зафиксированы неполадки в электронике и датчиках. Нарушения магнитного поля Земли привело к тому, что сеть, питающая электроэнергией всю Канаду, автоматически выключилась, длинные линии электропередач были выведены из строя, причем всё произошло менее чем за две минуты. После 1989 года все электрические и энергетические системы строятся с расчетом на подобные риски, связанные со значительными колебаниями геомагнитного тока.

Также интересным для исследования являются так называемые «солнечные бури на Хэллоуин» 2003 года — серии солнечных вспышек и корональных выбросов масс. Геомагнитная буря была оценена геостационарными спутниками GOES как X45, что делает ее одной из самых сильнейших. Буря также интересна тем, что впервые была оценена опасность для полетов воздушных судов — были серьезные неполадки в системах спутниковой навигации и связи, самолетам было запрещено совершать трансполярные перелеты, воздушное пространство над Швецией вовсе было закрыто, так как произошло повсеместное отключение электроэнергии на пару часов. Кроме того, многие спутники были повреждены или переведены в безопасный режим из-за повышенной солнечной активности. Космонавты на

борту МКС были вынуждены переместиться в более защищенную часть корабля из-за высокой радиационной опасности [3,15,17].

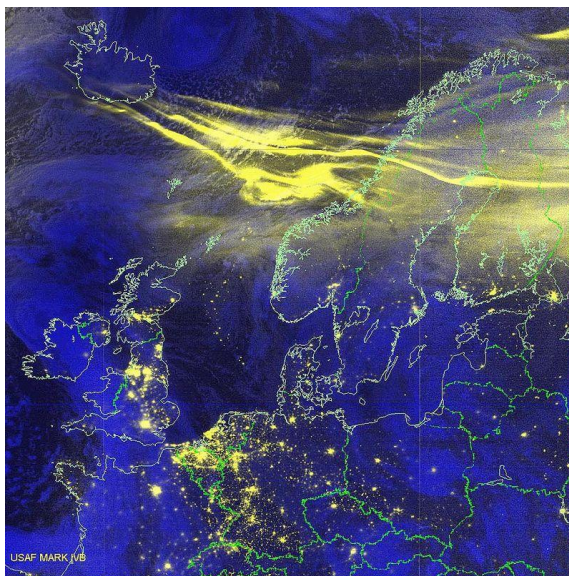


Рисунок 27 – Полярные сияния над Северной Европой
30 октября 2003 г.

В марте 2015 года произошла крупнейший геомагнитный шторм последнего, двадцать четвертого солнечного цикла. Несмотря на то, что возмущения магнитного поля были очень велики, сама солнечная вспышка не была X-класса, а класса М. Индекс Кр в своем максимуме достиг значения 8. Солнечная вспышка интересна тем, что наблюдались интенсивные полярные сияния в районе Москвы [17, 22]:



Рисунок 28 – Полярное сияние над Москвой

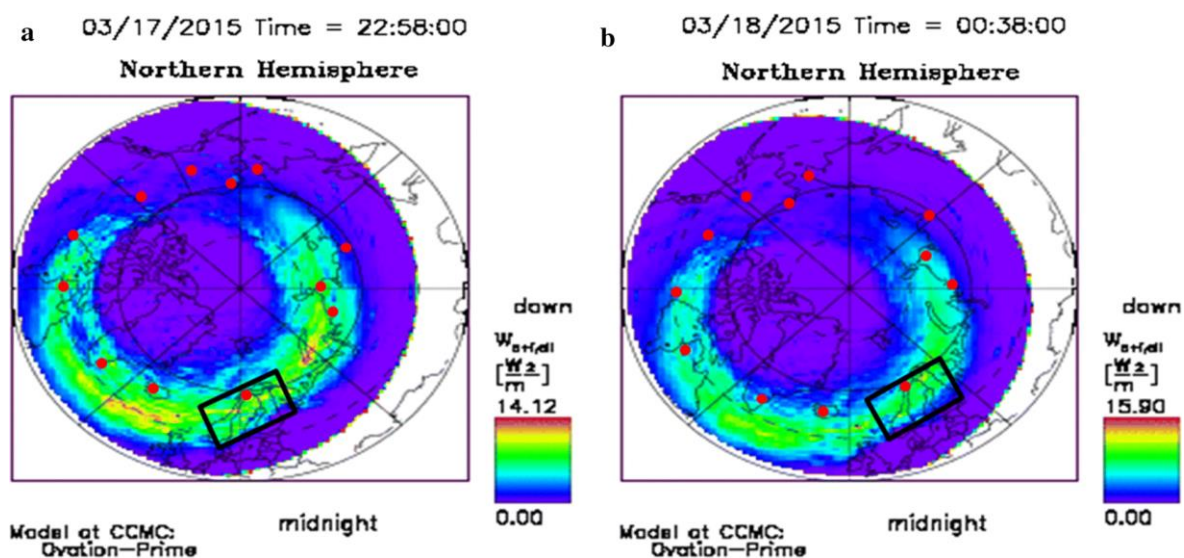


Рисунок 29 – Графики полярных сияний в северном полушарии по модели Ovation-Prime за 17 и 18 марта 2015 года. В черном прямоугольнике обозначены станции с магнитометрами

2.2 Нормативные документы о космической погоде

Предпосылки о создании некоего международного органа, который оповещал бы авиационные службы о космической опасности, существовали давно. Еще в 2010-х годах, после нескольких масштабных геомагнитных бурь, повлекших за собой изменение трасс полетов воздушных судов и возросшей радиационной опасности для летного экипажа, проводились различные инициативы и форумы. В 2015 году состоялось первое заседание Экспертной группы по космической погоде. В 2017-2018 годах было вынесено решение о создании специализированной службы, необходимой для аэронавигации, которая бы следила за космической погодой; были окончательно сформированы требования для будущих органов слежения и разосланы письма-приглашения двадцати восьми государствам-членам ИКАО для участия в конкурсе [12].

Для того, чтобы стать одним из поставщиком информации о состоянии космической погоды, странам-участникам было необходимо ввести в

эксплуатацию комплекс современных и технологичных аппаратурно-программных систем, который мог бы собирать, анализировать и подготавливать информацию о состоянии околоземного пространства, магнитосферы и ионосферы. Наконец, после долгих экспертных рассуждений, в Монреале 19 ноября 2019 года была введена новая служба непрерывного мониторинга глобальной космической погоды, которая обязана предоставлять для авиации общего назначения и коммерческой авиации консультативные сообщения о космической погоде. Всего было создано три международных глобальных центра (Space Weather Prediction Center — SWPC):

- ❖ консорциум ACFJ — Австралия, Канада, Франция, Япония;
- ❖ консорциум PECASUS (Европейский) — Великобритания, Польша, Нидерланды, Италия, Германия, Финляндия, Кипр, Бельгия, Австрия;
- ❖ США (Боулдер).

19 ноября 2021 года были введены еще два региональных центра:

- ❖ консорциум Китай-Российская Федерация;
- ❖ ЮАР.

Отметим, что в российском консорциуме основные функции выполняет Китай, тогда как Российская Федерация является вспомогательным центром.

Соответствующие поправки об использовании консультативных сообщений в бланках полетной документации, составляемых оперативной синоптической группой, введены в «Руководстве по авиационной метеорологии» от ИКАО, издание двенадцатое, за 2019 год, а также на основании пункта 6 ФАП №60 — «Предоставление метеорологической информации для обеспечения полетов воздушных судов» — и в соответствии с поправкой 78 в третьем приложении Конвенции международной ГА «Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации» от 8 ноября 2018 года. Для российской метеослужбы, подчиняемой Авиаметтелекому Росгидромета, был разработан Временный инструктивный материал, который станет основным после разработки обновленного ФАП [12].

2.3 Глобальные консультативные центры космической погоды

Глобальные центры космической погоды проводят дежурства, наблюдая за активностью Солнца, космическими лучами, состоянием магнитосферы и ионосферы, а также за составом высокоэнергичных частиц в атмосфере Земли. Дежурства делятся по две недели, причем один из центров выполняет функции дежурного центра — On Duty Center (ODC) — а другие считаются основными и вспомогательными резервными центрами [15].

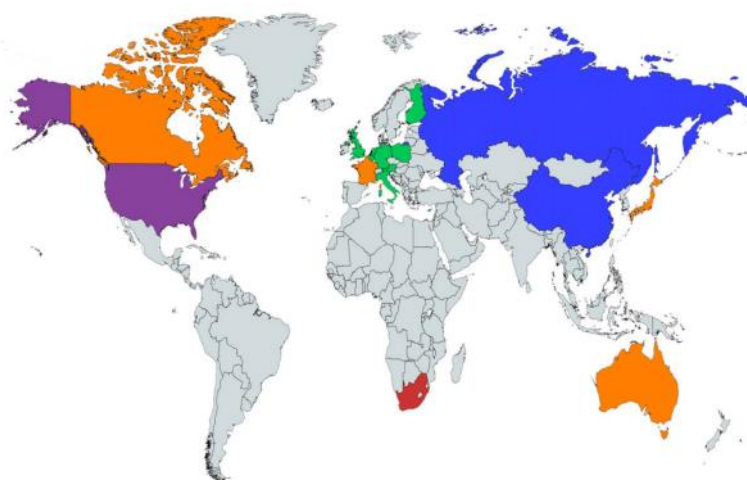


Рисунок 30 – Глобальные и региональные центры космической погоды

Международные службы, входящие в консорциум ACFJ и следящие за состоянием космической погоды, следующие: в Австралии это Метеорологическое бюро (Bureau of Meteorology — BOM), в Канаде — Министерство природных ресурсов (Natural Resources Canada — NRCan), во Франции их несколько, они связаны с Центром космических исследований (National Centre for Space Studies — CNES) и с метеорологической службой, в Японии — Национальный институт информационных и коммуникационных технологий (National Institute of Information and Communications Technology).

Австралия располагает обширной сетью ионозондов, магнетометров, спектрографов, обсерваторий с возможностью гелиосейсмологии, реометров,

приборов для измерений общего содержания электронов и нейтронов, аппаратуры для регистрации сцинтилляций. Сеть распространяется не только на сам материк, но и на южные воды Тихого океана и Антарктику. Команда по прогнозированию космической погоды состоит из 3 старших и 7 младших специалистов-прогнозистов, работающих круглосуточно в Национальном операционном центре [15].

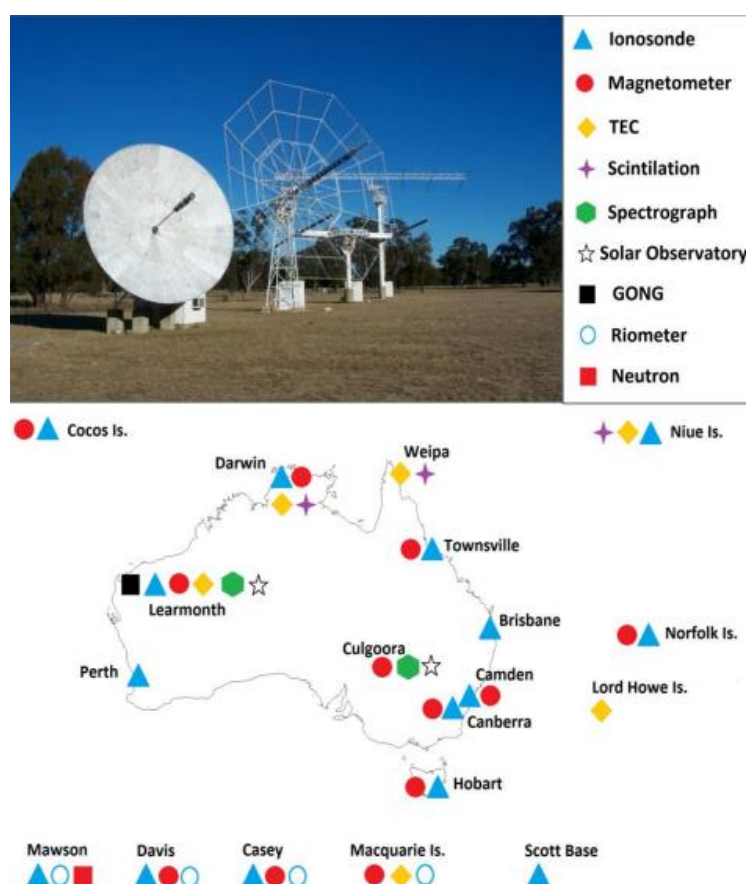


Рисунок 31 – Австралийская сеть наблюдения
за космической погодой

Служба Канады ведет исследования и наблюдения за магнитосферой, начиная с 1976 года, и первоначально составляла прогнозы для аэромагнитной съемки, систем электроснабжения, которые были расширены за счет введения спутников. Начиная с двухтысячных служба составляла прогнозы для трансполярных перелетов. Канада также обладает сетью магнетометров, реометров и GNSS-приёмников [15]:

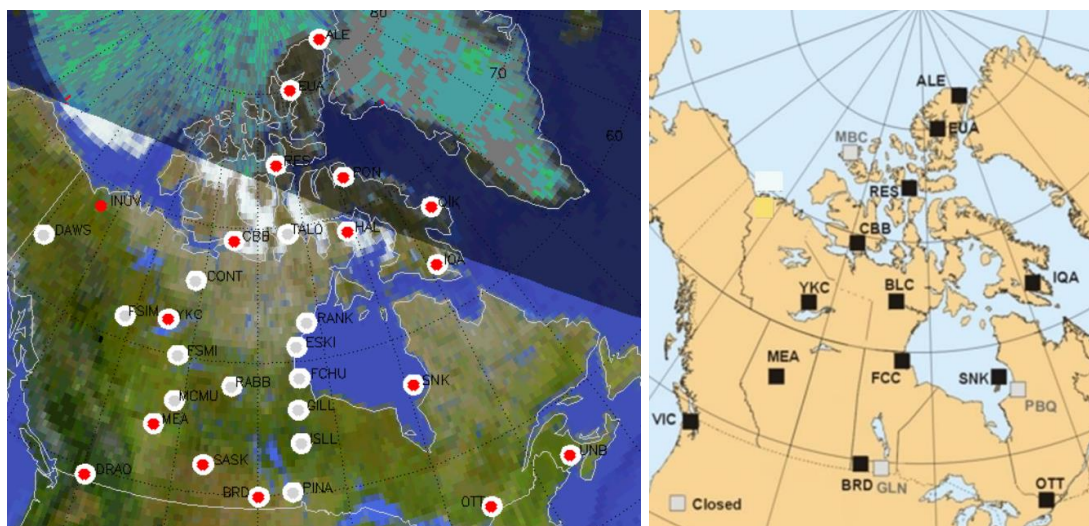


Рисунок 32 – Канадская сеть наблюдения за космической погодой

Французское бюро занимается исследованием околоземного пространства с 2000 года, оперативным прогнозированием космической погоды с 2006 года, активно исследуя радиационные и ионосферные сцинтилляции. Также сотрудничает с Консультативным центром по вулканическому пеплу и расположен в Тулузе. Франция проводит мониторинг ионосферных сцинтилляций не только по своей стране, но и по Западной Африке, а также контролирует обширную сеть высокотехнической аппаратуры по всей Европе и части Африки [15].

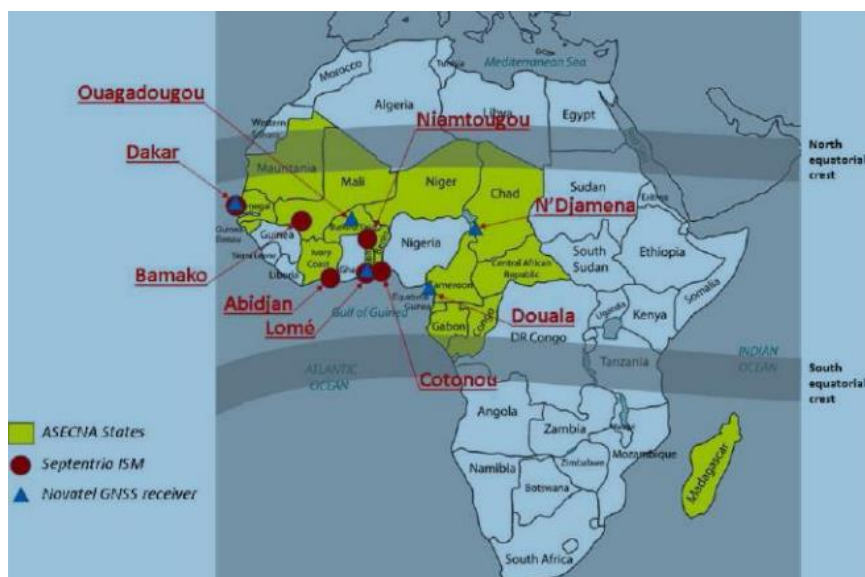


Рисунок 33 – Совместная с Агентством по управлению воздушным движением Африки сеть слежения за космической погодой

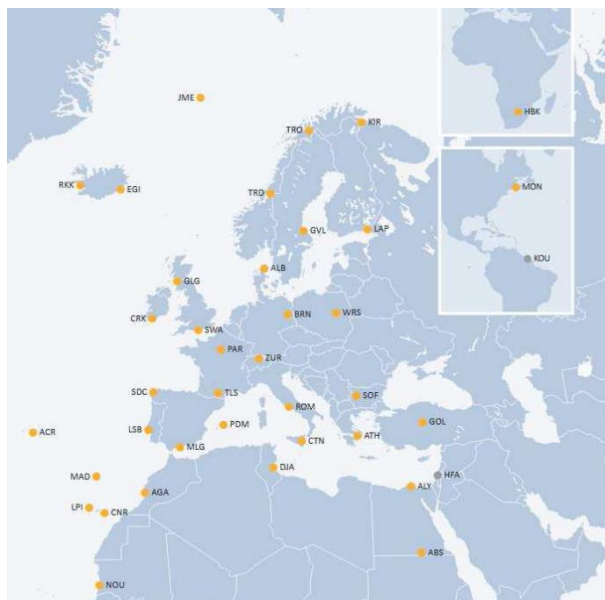


Рисунок 34 – Сеть станций слежения за космической погодой

Японский институт технологий занимается изучением спектров солнечного радиоизлучения с 1952 года. С 1957 года проводились оповещения о нарушениях в распространении радиоволн. В 1978 году институт впервые представил глобальную карту слежения за состоянием ионосферы с использованием спутниковых наблюдений. Японский институт обладает сетью ионозондов, магнетометров, высокочастотных радаров и обсерваторий с возможностью наблюдений за солнечным ветром. Интересно, что данные магнетометров, установленные на территории России, в том числе обрабатываются в Японии [15].

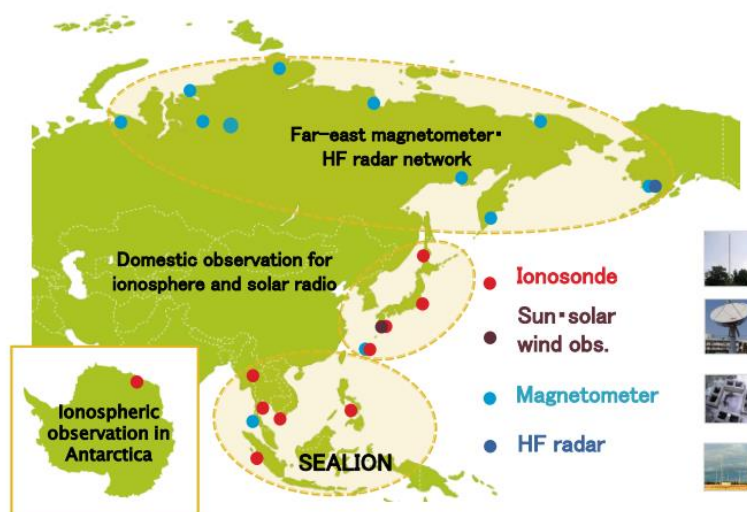


Рисунок 35 – Японская сеть наблюдения за космической погодой

Консорциум ACFJ делит между собой обязанности таким образом, что некоторые службы (в основном Япония), выпускает сообщения рекомендательного характера, тогда как за распространение основной информации отвечает Франция (за радиационную опасность и нарушения в спутниковом позиционировании) и Австралия (за нарушения в высокочастотной связи). ACFJ использует модель SiGLE, которая оценивает дозу облучения во время крупных опасных гелиогеофизических явлений. Для слежения за концентрацией высокоэнергичных частиц используются модели EPCARD (для ГКЛ во время отсутствия солнечной активности) и SiGLE (во время солнечных событий) [15].

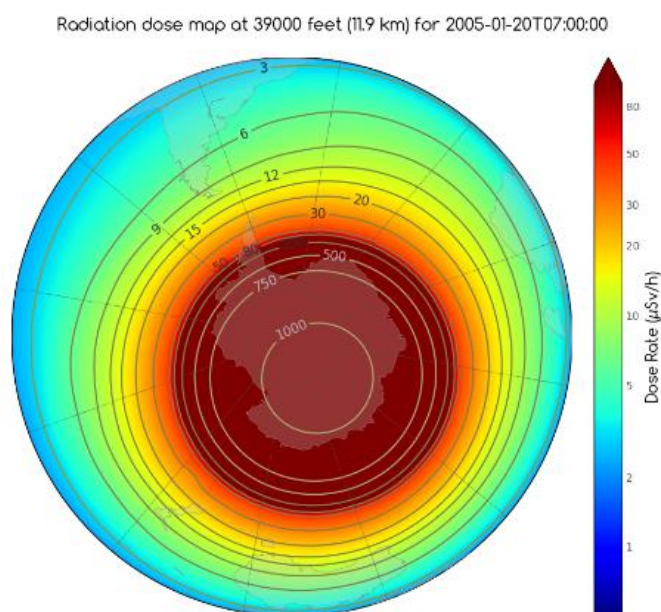


Рисунок 36 – Карта дозы радиации, построенная моделью SiGLE

PECASUS — это один из трех глобальных центров космической погоды, предоставляющих информацию в соответствии с правилами ИКАО. Консорциум представляет собой масштабную службу, основанную на тесном и целенаправленном сотрудничестве европейских научных центров и институтов, обладающих передовым опытом в областях воздействия космической погоды на полеты воздушных судов [19].

Среди центров, входящих в PECASUS, можно выделить несколько. К примеру, Финский метеорологический институт, который с 2014 года

управлял национальным круглосуточным центром космической погоды. В случае экстремальной активности Солнца, Финский институт предоставляет оповещения для правительственных органов и органов безопасности в рамках национальной системы раннего предупреждения об опасных природных явлениях (LUOVA). Финский метеорологический институт тесно взаимодействует с Экспертными обслуживающими центрами (Expert Service Centres — ESC), которые консультируют по поводу возмущений космической погоды, гелиосферных явлений, космической радиации, деформации ионосферы и магнитосферы [19].

MetOffice — национальная метеорологическая служба Великобритании — также входит в PECASUS. Данная служба имеет долгую историю, начиная с 1854 года, и делает прогнозы во всех временных масштабах от изменения климата до классических краткосрочных, а также прогнозы по распространению вулканического пепла и относительно недавно по опасным гелиогеофизическим явлениям. Германию в консорциуме представляет Немецкий центр авиации и космонавтики. В большей степени этот центр специализируется на информации о состоянии ионосферы в режиме реального времени, необходимой для навигации и определения местоположения воздушного судна с помощью системы GNSS. Также за ионосферой над Европой наблюдает польский Центр космических исследований; для работы также используется реометр на польской исследовательской станции в Хорнсунде (Шпицберген), который позволяет наблюдать явления поглощения полярной шапки, иногда нарушающие КВ-связь в высоких широтах [19].

Национальный институт геофизики и вулканологии в Италии непрерывно отслеживает ионосферные и геомагнитные условия для высокочастотной связи и связи системы GNSS в районе Средиземноморья, а также проводит систематические измерения сцинтилляции над Шпицбергом. Южноафриканское национальное космическое агентство, созданное для содействия развитию космонавтики в регионе и для укрепления сотрудничества в сфере космической деятельности, является членом

европейского консорциума. Кроме того, также в PECASUS входит частный университет Фредерика на Кипре, Королевский бельгийский институт космической астрономии, Королевский метеорологический институт Нидерландов и лаборатория в Зайберсдорфе, Австрия [19].

Третий глобальный центр — Центр прогнозирования космической погоды (SWPC), до 2007 года именовавшийся Центром космической среды. SWPC является исследовательской лабораторией Национальной метеорологической службы США, входящей в состав Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA). Центр прогнозирования находится в Боулдере, штат Колорадо, и является официальным источником консультативных сообщений о космической погоде для Соединенных штатов. Он обеспечивает круглосуточный мониторинг и прогнозирование опасных гелиогеофизических явлений в режиме реального времени, проводит гелиофизические и геофизические исследования, разрабатывает новые модели и методы прогнозирования солнечных, магнитосферных и ионосферных возмущений. SWPC совместно управляется NOAA и BBC США. Услугами Центра прогнозирования космической погоды пользуются не только авиационные компании и NASA, но и департамент транспорта, так как из-за неблагоприятных явлений космической погоды ухудшается GPS-сигнал, и ведомства, связанные с электросетями и энергетикой [15].

Федеральное авиационное управления США требует, чтобы диспетчеры учитывали ухудшение высокочастотной связи для каждого трансполярного рейса. Также рейсы могут быть задержаны или отменены, если предполагаемые затраты из-за предупреждений о солнечной активности достигнут 100 тысяч долларов за рейс. К примеру, в 2001 году из-за отключений радиосвязи было изменено расписание двадцати пяти рейсов. Так как до февраля 2022 года консультативные сообщения не передавались для коммерческих космических запусков, из-за солнечной активности были потеряны 38 спутников Starlink от SpaceX [15].

На сайте Центра прогнозирования космической погоды есть множество информации, удобной как для ученых, так и для обычных пользователей. В графическом виде представлены суточные и последние наблюдения по шкале NOAA об условиях космической погоды и их возможном воздействии на людей и системы, снимки Солнца со спутника GOES и наблюдения за корональными выбросами масс в реальном времени, а также прогноз полярных сияний и графики планетарных индексов состояния атмосферы Земли. Помимо этого, на сайте можно посмотреть долгосрочные и краткосрочные прогнозы опасных гелиогеофизических явлений, отчеты о прошедшем периоде солнечной активности, содержании высокозаряженных частиц в ионосфере и о солнечном ветре. Многие региональные сайты, посвященные космической погоде, ссылаются именно на данные от NOAA, в том числе и российский сайт [15].

Центр космической погоды под руководством Института прикладной геофизики им. Фёдорова представляет Российскую Федерацию в региональном консорциуме Китай-Россия. Институт был основан в 1956 году и сперва в его задачи входил мониторинг уровня загрязнений земной поверхности и атмосферы продуктами радиоактивного распада в ходе проведения ядерных испытаний и слежение за экологической безопасностью. С развитием космонавтики ИПГ им. Фёдорова использует для своих исследований спутниковые аппараты и осуществляет международный обмен информацией о солнечной активности, геомагнитных бурях и флуктуациях ионосферы. Институт является головной организацией в России, занимающейся ионосферными, магнитосферными и гелиогеофизическими наблюдениями и находится под управлением Росгидромета. Российская Федерация обладает не самой обширной наблюдательной за космической погодой сетью: это по крайней мере три магнитометра (расположены в Магадане, Паратунке и на мысе Шмидта), две камеры инфракрасного и оптического диапазона (Магадан, Паратунка) и один солнечный радиоспектрометр, расположенный в Иркутске [3, 12, 13].

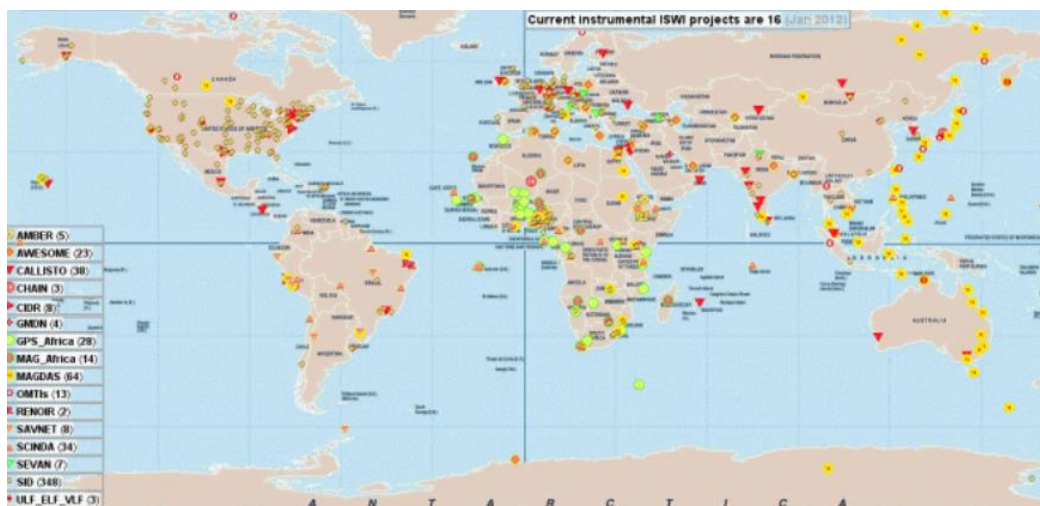


Рисунок 37 – Международная сеть космических наблюдений

2.4 Мониторинг космической погоды

В предыдущем разделе рассматривалась сеть наблюдений за космической погодой, подразумевающая непрерывное наблюдение и получение необходимых данных в режиме реального времени. Остановимся на мониторинге космической погоды подробнее.

Наблюдения за солнечной активностью производятся с использованием разных диапазонов длин волн и по-своему удобны. С помощью сети наземных наблюдений в виде различных обсерваторий проводятся исследования в оптическом диапазоне, однако такие наблюдения хоть и регулярные, но не круглосуточные и не всепогодные, предназначены в основном за слежением числа солнечных пятен и количеством активных областей. Также используются солнечные телескопы с диаметром линз не более одного метра, так как мощность излучения Солнца колоссальна, и с длинным фокусом — у самых высокотехнологичных солнечных телескопов фокусное расстояние между объективами измеряется сотнями метров. Такие телескопы очень крупные, часто их делают неподвижными и «ловят» луч света с помощью двух зеркал. Солнечные телескопы бывают вертикальными и горизонтальными. У них есть свои особенности: солнечные телескопы работают днем, и за счет нагрева земной поверхности и усиления турбулентности их разрешающая

способность ухудшается, поэтому оборудование выкрашивают в белый, как и метеорологические будки, и устанавливают сами телескопы на башнях. Еще одна проблема, которую не так легко решить, это тепловая нагрузка на приборы из-за фокусированного в одну точку излучения Солнца, поэтому в современных телескопах предусмотрены системы охлаждения. В России такие телескопы установлены в Крымской астрофизической обсерватории, в Саянской и Байкальской [3, 15, 17].



Рисунок 38 – Шведский солнечный телескоп, расположенный на Канарских островах, Обсерватория Роке-де-лос-Мучачос

Солнечные телескопы удобны тем, что проводят наблюдения не только в видимом диапазоне, но также и в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном. Также в качестве вспомогательных приборов используются солнечные рентгеновские телескопы, радиотелескопы для интегрального потока излучения на длине волны 10,7 см и аксионные солнечные телескопы, предназначенные для поиска гипотетической элементарной частицы аксион. Наблюдения не в оптическом диапазоне выгодны тем, что не зависят от

времени суток и погодных условий, а также с их помощью легче получить количественный пересчет уровня активности Солнца.

Коронографы предназначены для наблюдений за солнечной короной, так как ее излучение не видно в оптическом диапазоне. Коронографы бывают солнечными и звездными — для наблюдений за другими звездами или для поиска планет и звезд вне состава нашей системы. Наземные коронографы используют явление поляризации, чтобы «отделить» яркость неба от изображения короны, так как оба являются следствием рассеяния солнечного света и имеют схожие спектральные свойства, однако корональный свет рассеивается по закону Томсона практически на прямой угол и подвергается поляризации, тогда как свет неба вблизи нашего светила рассеивается только под углом скольжения. По сути, коронограф — это рефрактор со сложным устройством из различных оптических схем и узкополосных светофильтров.



Рисунок 39 – Коронограф, расположенный в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН

Спутниковые коронографы намного эффективнее отслеживают солнечную активность, так как отсутствует атмосферное рассеяние. К примеру, космический коронограф LASCO избегает уже упомянутой выше проблемы яркости света неба, но сталкивается со сложностью дифракции

входящего света вокруг краев аппаратуры. Самый современный коронограф LASCO C-3 использует сразу несколько затенителей: внешний, отбрасывающий тень на сам прибор, и внутренний, блокирующий рассеянный свет вокруг внешнего затенителя, и система нескольких перегородок. Изображение с коронографа приводилось на рисунке 12 [15,17].

Спектрогелиографы — приборы, используемые для монохроматического изображения Солнца, то есть на одной длине волны, которая выбирается таким образом, чтобы совпадать со спектральной длиной волны элементов, содержащихся на Солнце. Спектрогелиограф состоит из дифракционной решетки или из призмы и монохроматора, который представляет из себя узкую щель, пропускающую только одну длину волны. Обычно данные приборы установлены на борту космических спутников.

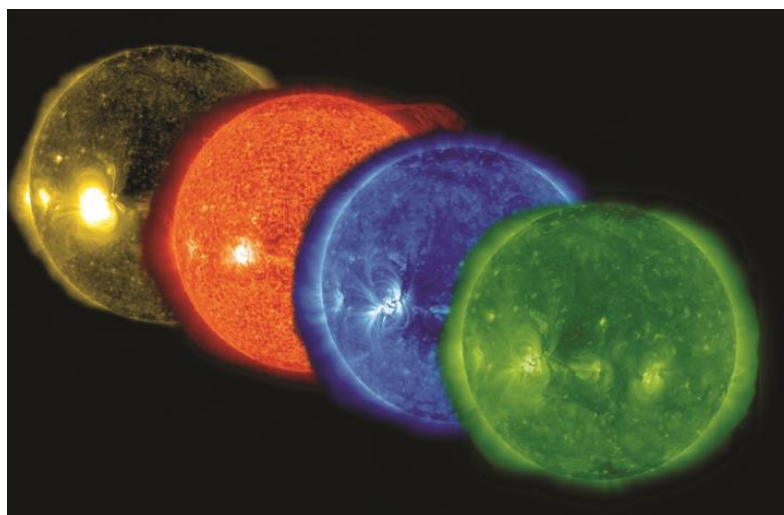


Рисунок 40 – Солнечный диск в длинах волн 171, 304, 335 и 94
Ангстрем

Естественно, наблюдения за солнечной активностью и межпланетной средой в большей степени производится с помощью различных космических аппаратов и приборов, установленных на их борту. Рассмотрим кратко действующие спутники. Один из них, находящийся на орбите более 27 лет, является совместным проектом Европейского космического агентства и NASA

— SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). Основной задачей SOHO является изучение Солнца. Комплект приборов на борту SOHO разнообразен и направлен на комплексное изучение состояния солнечной атмосферы, параметров солнечного ветра и деятельности солнечной короны. Среди приборов можно выделить следующие: спектрометр для диагностики короносферы, ультрафиолетовый телескоп, уже упомянутый выше коронограф серии LASCO, инструмент для получения карты магнитного поля и силовых линий Солнца MDI/SOI и различные датчики, предназначенные для анализа высокоэнергичных частиц [15].

Спутники STEREO довольно подробно были рассмотрены в разделе 1.5 «Корональные выбросы масс». Также чаще всего упоминались снимки с SDO — Обсерватории солнечной динамики, проекта NASA. Главная миссия SDO заключается в исследовании влияния Солнца на Землю и околоземное пространство. На борту Обсерватории находится множество приборов, в том числе и изучающих процесс генерации магнитного поля, структуры силовых линий, регистрирующих изменения солнечной радиации и измеряющие параметры солнечного ветра. Изображения с SDO поступают в шестнадцать длинах волн, их можно посмотреть в режиме реального времени, так как они находятся в свободном доступе [15].

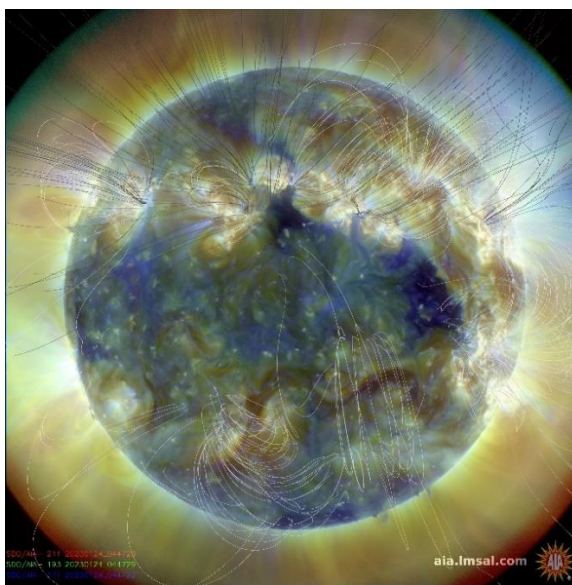


Рисунок 41 – Пример изображения, полученного с SDO

Существуют специальные геостационарные метеорологические спутники, и чаще всего именно они являются основными вспомогательными элементами в изучении вариаций солнечных и галактических космических лучей. Один из них — GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite), это серия американских спутников от NASA, с помощью них синоптики могут не только отслеживать шторма и изменения состояния погоды, но и получать информацию о солнечной активности. На данный момент действуют четыре спутника GOES. На борту GOES находится система SEM: магнитометр, рентгеновский датчик, детектор протонов, альфа-частиц и прочих высокозаряженных частиц [15].

Спутники серии «Электро-Л» (ГГКК — Геостационарный Гидрометеорологический Космический Комплекс) являются российскими, обеспечивают многоканальную съемку в видимом и инфракрасном диапазонах. В данный момент на орбите находится два работающих спутника. Спутники предназначены не только для слежения за погодой, но и для изучения параметров магнитосферы и ионосферы Земли. Аппаратура, установленная на борту, позволяет регистрировать потоки электронов, протонов, ГКЛ выше значимых пороговых значений, рентгеновское солнечное излучение от 3 до 8 кэВ и ультрафиолетовое солнечное излучение [12].

Мониторинг состояния магнитосферы проводится с помощью международной наблюдательной сети. Измерительные комплексы состоят из нескольких магнитометров: векторных (для измерения трех компонентов геомагнитного поля), скалярных (для измерения вариации магнитосферы) и индукционных (необходимых для измерения пульсаций магнитосферы). Подробнее про наблюдения за магнитосферой рассмотрено в разделе 1.8.

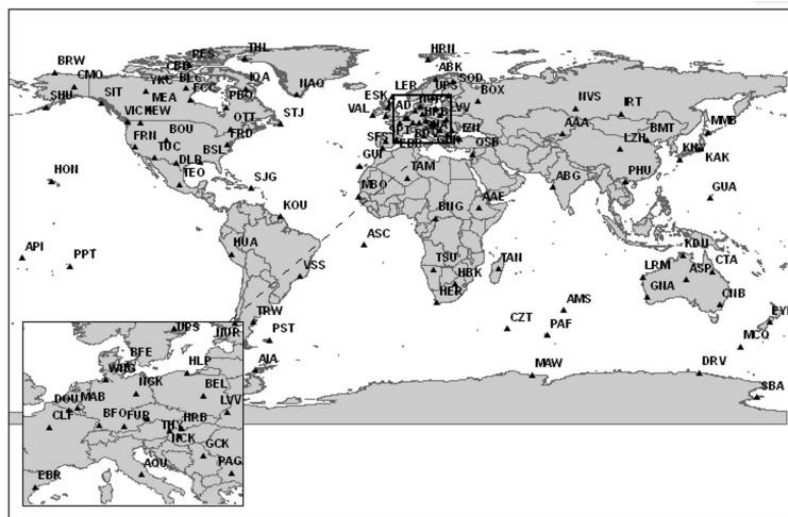


Рисунок 42 – Сеть международных геомагнитных обсерваторий

Мониторинг ионосферы проводится несколькими методами. Один из них — вертикальный, суть которого заключается в отражательной способности ионосферы. Определяется время пробега радиоволны от приемника к передатчику через точку отражения, строятся ионограммы, запускаются ионозонды. На данный момент это также международная сеть из 130 станций в самых разных концах мира. Большинство станций располагаются совместно с метеорологическими [2].



Рисунок 43 – Станции с вертикальным зондированием ионосферы

С развитием технологий всё чаще применяется некогерентный метод рассеяния радиоволн, основанный на регистрации слабого сигнала, который уменьшается из-за свободных электронов, содержащихся в ионосфере. Таким методом измеряются спектральные характеристики ионосферы и концентрация электронов в верхней атмосфере в слое от 70 до 1000 км. Метод рассеяния радиоволн позволяет измерять на нескольких рабочих частотах. Так как для оборудования данного метода необходимы новейшие радары и приёмные устройства с высокой чувствительностью, таких обсерваторий всего 11 по всему миру, что показано на рисунке 44 [2,15].



Рисунок 44 – Станции зондирования с некогерентными радарами

Кроме того, используются и спутниковые методы мониторинга ионосферы, такие как радиопросвечивание с помощью системы GNSS. С помощью международного сотрудничества стран со спутниковыми радиационными системами — Российской Федерации, Китая, Европы и США — были созданы глобальные ионосферные карты и модели ионосферы. Данные исследования доступны для каждого пользователя в реальном времени.

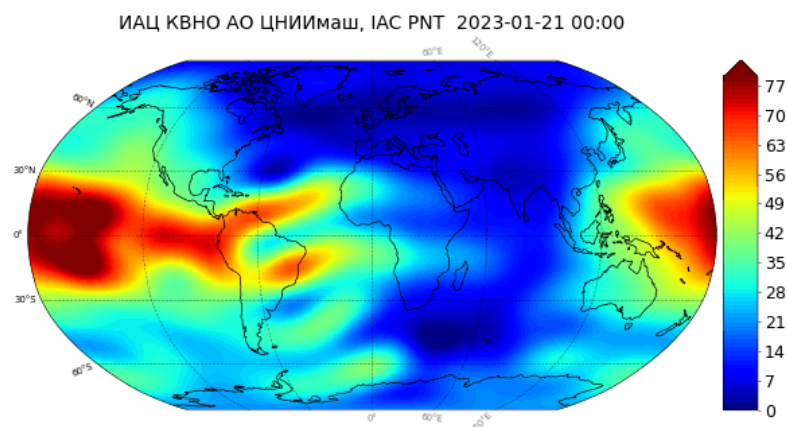


Рисунок 45 – Глобальная карта ионосферы, построенная по модели Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения IAC PNT

2.5 Влияние явлений космической погоды на радиосвязь

Несмотря на то, что явления космической погоды могут возникнуть за короткое время, их влияние проявляется практически сразу и длится до нескольких дней. С точки зрения авиации, опасными явления считаются тогда, когда солнечная активность и/или космические лучи становятся причиной неполадок в работе систем связи, навигации и наблюдения за воздушным судном и повышением критического уровня радиации. Для международной авиационной службы центры космической погоды рассматривают только конкретные возмущения: геомагнитные и ионосферные бури, солнечные вспышки и солнечную радиацию [3,12].

Остановимся на ухудшении радиосвязи. Прежде всего стоит отметить, что радиосвязь ухудшается из-за влияния опасных гелиогеофизических явлений на ионосферу. Напомним, что ионосфера — это один из верхних слоев нашей атмосферы, в котором частицы ионизированы под действием ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца. Так как данный слой атмосферы ионизирован, он обладает способностью отражать

коротковолновые частоты, обеспечивая надежную радиосвязь, что, очевидно, очень важно для полетов воздушных судов. Во время геомагнитных бурь в ионосферу поступает дополнительная энергия, появляется избыточная ионизация, вызывающая деформацию слоя. Из-за этого происходят сбои в высокочастотной связи, так как радиоволны поглощаются или отражаются. В зависимости от типа геомагнитной бури коротковолновая связь может ухудшиться или на освещенной Солнцем стороне Земли, или вблизи полюсов. Как правило, геомагнитные бури сильнее в высоких широтах. Воздействие солнечной вспышки на ионосферу длится от нескольких минут до нескольких часов и называется ионосферным штормом [9,12,19].

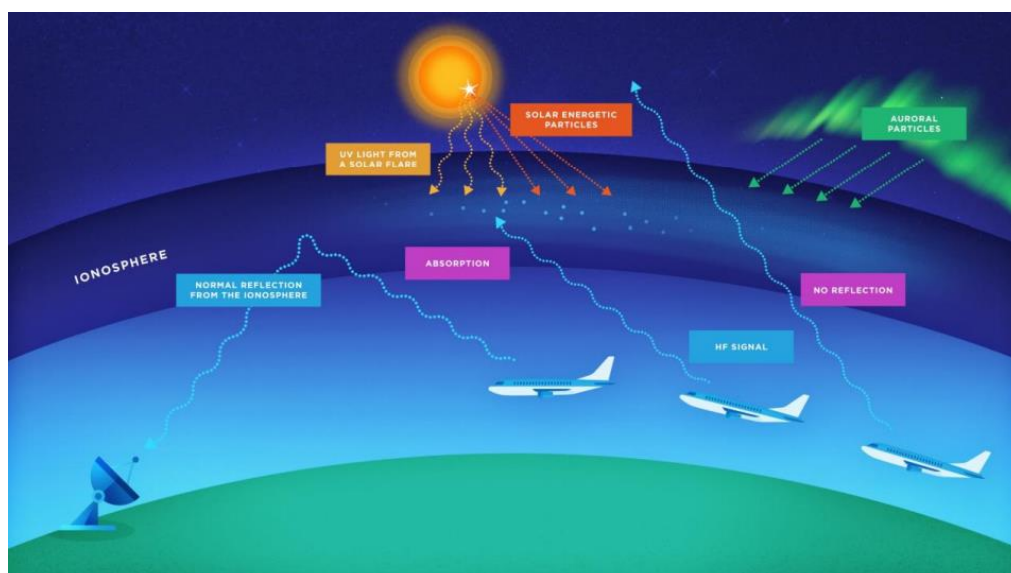


Рисунок 46 – Упрощенная схема воздействия солнечной активности на ионосферу и, как следствие, на радиосвязь

Стоит отметить некоторые отражательные особенности ионосферы. Так коротковолновый диапазон с низкими частотами обеспечивает дальнюю связь, отражаясь обратно к Земле, тогда как с высокими частотами обеспечивается связь с космическими спутниками: волны проходят через ионосферу и теряют амплитудную и частотную стабильность. Также имеются свои широтные особенности, так как влияние геомагнитных бурь на ионосферу на экваторе и в полярных шапках неодинаковое [2,3,12].

На низких и средних широтах коротковолновая связь используется во время трансокеанских перелетов, так как связь на ультракоротких волнах в пределах видимости недоступна. Из-за солнечных вспышек теряется связь на освещенной Солнцем стороне Земли: излучение Солнца в рентгеновском диапазоне влияет на плотность электронов в низких слоях ионосферы, из-за чего могут возникнуть шумы, затухания или вовсе полное прекращение радиосвязи — так называемый блэкаут. Обычно такие возмущения ионосферы недолговечны, их длительность до нескольких часов [2,12].

Нестабильность ионосферы на высоких широтах, особенно в зонах полярных шапок, может ухудшить коротковолновую связь на более длительный период, вплоть до нескольких дней. Как упоминалось ранее, данные широты в меньшей степени защищены магнитным полем Земли и являются открытыми для проникновения высокоэнергичных частиц. Протоны, попадающие в ионосферу в результате геомагнитных бурь, изменяют привычную степень ионизации атмосферы, приводят к преломлению коротких волн и увеличивают поглощение радиоволн в полярных шапках — явление ПППШ [2,9].

Стоит отметить, что коротковолновая связь является основным источником связи для широт, находящихся выше 82° , так как спутниковая часть зачастую нестабильна, а ультракоротковолновая сильно затруднена из-за технических особенностей, возникающих вследствие труднодоступности региона. С ростом технологического прогресса, спутников, расположенных на полярных орбитах, становится все больше, что обеспечивает возможность трансполярных перелетов, однако и они сильно подвержены влиянию космической погоды.

В целом для спутниковой связи используются высокие диапазоны коротковолновой связи — выше нескольких ГГц — для того, чтобы ионосфера считалась прозрачной. Однако при сильных геомагнитных бурях и суббурях возникает неоднородность и турбулентность ионосферы — сцинтилляция. Сцинтилляция ионосферы является причиной мерцания фазы

переданного сигнала и его амплитуды. Из-за эффекта Доплера может быть сдвинута радиоволна, вследствие чего захват волны приемником становится невозможен или затруднен. Сильные сцинтилляции ионосферы могут привести к полному блэкауту или ослаблению спутниковой связи в экваториальных широтах в период от захода Солнца до полуночи по местному времени, так как изменяется концентрация высокозаряженных частиц и идет влияние ионосферных аномалий — поэтому сцинтилляции имеют ярко выраженную сезонную зависимость и становятся сильнее в периоды максимальной солнечной активности. Интересно, что в экваториальной зоне преобладают амплитудные сцинтилляции, тогда как в высоких и полярных широтах — фазовые, также приводящие к потере или постепенном угасании радиосигналов. Также стоит отметить, что фазовые сцинтилляции происходят в атмосфере практически всегда и не ухудшают спутниковую связь [2].

Среди примеров значимого влияния геомагнитной бури на ионосферу и коротковолновую связь можно привести события октября-ноября 2003 года — солнечные бури на Хэллоуин. Тогда была значительно ослаблена спутниковая связь, что отмечалось операторами по всему миру, и наземные GPS-приемники в течении нескольких часов не могли в полной мере принять ультракоротковолновые сигналы на средних широтах. Также в 2015 году на освещенной стороне планеты радиолокаторы, функционирующие на высоких и ультравысоких частотах, подверглись шумовому воздействию из-за ионосферной бури [3,15].

2.6 Влияние явлений космической погоды на спутниковую навигацию

Воздействие ионосферной бури отрицательно сказывается не только на характеристиках радиосистем, но и на космической навигации, спутниковом позиционировании и дистанционном зондировании, так как сигнал, отправленный спутником, должен пройти через ионизирующий слой, прежде чем достичь приемника. Когда спутниковый сигнал сталкивается с

препятствиями в виде резко возросшей энергии частиц — нейтронов и протонов — его фаза и амплитуда могут очень быстро измениться. Точно также, как и когда количество электронов в ионосфере из-за солнечной активности резко возрастает, в спутниковую навигацию вносятся ошибки позиционирования. Мерцания могут помешать приемнику зафиксировать сигнал и сделать вычисления его местоположением невозможным [3,12].

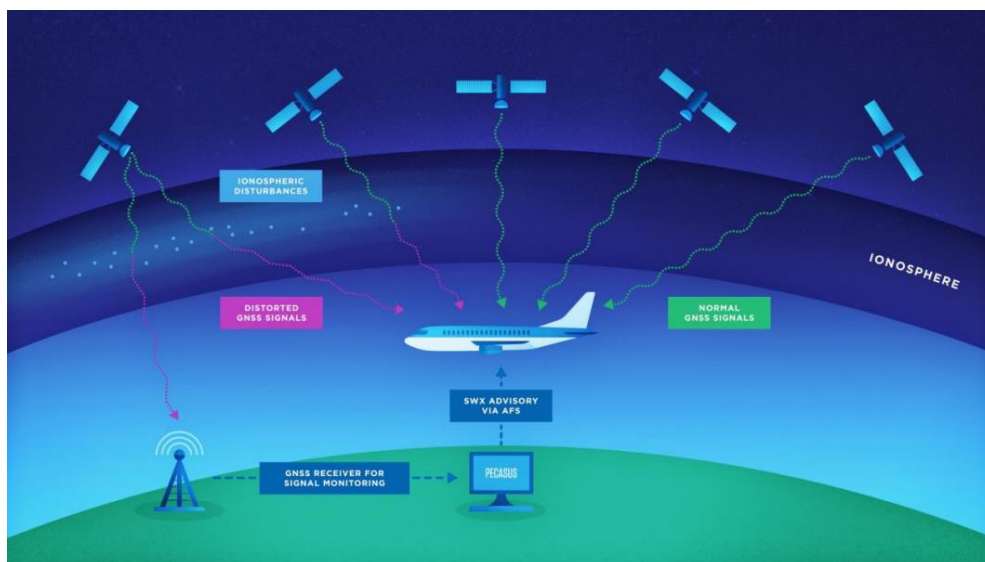


Рисунок 47 – Упрощенная схема воздействия солнечной активности на спутниковое позиционирование

Очевидно, что с ростом технического прогресса наземные средства навигации в виде радаров постепенно уходят в прошлое, тогда как системы типа GPS и повсеместное внедрение Глобальной Навигационной Спутниковой Системы (GNSS) дает возможность транспортным системам использовать новые приборы с большим охватом территории и более высокой надежностью. Практически у каждой передовой страны есть своя спутниковая система навигации. К примеру, уже упомянутая GPS-система всепогодна и не охватывает только самые высокие, приполярные широты. Она разработана американским министерством обороны и доступна для любого гражданского потребителя. По состоянию на 2023 года, на земной орбите находится 32 спутника [18].

ГЛОНАСС — отечественная система спутникового позиционирования, также принадлежащая министерству обороны, состоит из 24 спутников, движущихся в трех орбитальных плоскостях и, в отличие от системы GPS, не имеющих синхронности со вращением Земли. Также российские спутники имеют больший обзор по сравнению с американскими и захватывают полярные широты. Система ГЛОНАСС управляется наземным сегментом из Центров управления системой (ЦУС) и Командных станций слежения (КСС). Стоит отметить, что на данный момент практически все российские авиакомпании завязаны исключительно на GPS, однако постепенно начинается переход на отечественную систему навигации [18].

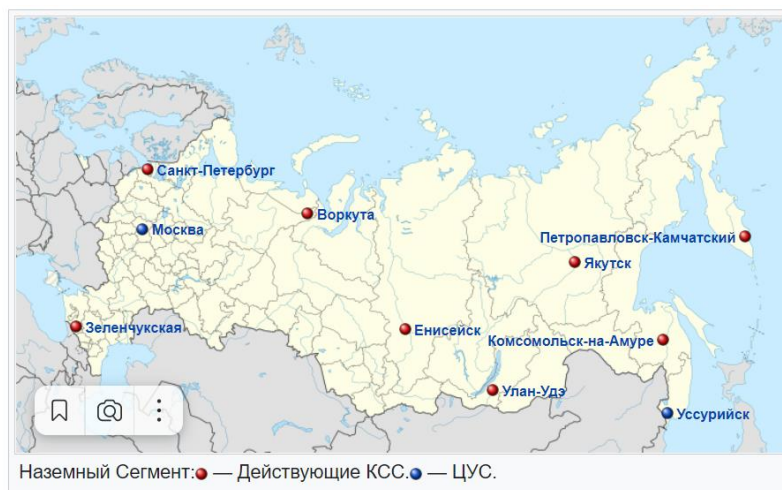


Рисунок 48 – Наземный сегмент управления ГЛОНАСС

BeiDou — китайская спутниковая навигационная система. В настоящее время на орбите выпущено 30 спутников, и с относительно недавнего времени BeiDou составляет конкуренцию GPS, ГЛОНАСС и европейской Galileo, которая находится на этапе создания общей спутниковой группировки. Также есть IRNSS — региональная индийская навигационная система и региональная японская QZSS, являющаяся единственной квази-зенитной, что позволяет лучше получать сигнал в мегаполисах, где высокое экранирование и отражение сигналов от небоскребов [18].

Итак, опасные гелиогеофизические явления влияют на спутниковую навигацию тремя способами:

- ❖ появляются шумы в сигнале из-за радиоизлучения Солнца;
- ❖ приемники теряют захват сигнала;
- ❖ рассчитанное местоположение может быть некорректным.

Все спутники GNSS имеют две частоты для передачи сигналов со спутника на наземный приемник: 1575,42 МГц и 1227,60 МГц. Во время солнечных вспышек излучение от Солнца генерируется на таких же длинах волн. Также стоит учитывать поляризацию волны: у спутниковых сигналов она круговая, специально для меньшей восприимчивости к неблагоприятным условиям атмосферы, тогда как любые солнечные и галактические явления — от излучения короны до космических лучей — имеют и линейную, и круговую поляризации. Когда поляризации излучений совпадают, высок риск появления шумов в спутниковом сигнале, а также не исключена потеря захвата приемником сигнала, особенно на освещенной Солнцем стороне Земли. Например, солнечное излучение подавило слабый GPS-сигнал в декабре 2006 [3, 6].

Ранее упоминалось о том, как сцинтилляции ионосферы влияют на потерю захвата сигнала приемником и отмечалось, что при повышенной солнечной активности в виде солнечных вспышек непрерывное получение и отслеживание сигнала становится затруднено. Стоит отметить, что низкие частоты чаще наиболее восприимчивы к космической погоде, а значит уязвимы для потери сигнала, так как с уменьшением частоты увеличивается сцинтилляция, причем для полярных районов характерны фазовые сцинтилляции, для экваториальных — амплитудные [6, 12].

Ошибка в определении местоположения объекта из-за ионосферных бурь является наиболее распространенной. Из-за солнечной активности изменяется общая для ионосферного слоя концентрация электронов и прочих заряженных частиц, причем степень изменения сложно определить обычными моделями, так как необходимо узнать влияние для определенных частот, на которых действуют системы GNSS. Стоит учитывать и то, что в ионосфере могут образоваться области, где концентрация электронов будет сильно

повышена или понижена по сравнению с общим слоем. Такие пятна приводят к тому, что скорость сигнала непредсказуемо изменяется. Соответственно, и определяемое расстояние через точку отражения увеличивается или уменьшается на десятки метров по сравнению с реальными значениями [3,9].

2.7 Влияние явлений космической погоды на радиацию

Во время солнечных бурь и высокоинтенсивных галактических космических лучей такие частицы как протоны на огромной скорости достигают околоземного пространства и проникают в атмосферу на магнитных полюсах и в радиационный пояс нашей планеты. Сталкиваясь с частицами, уже находящимся в радиационном поясе, они порождают вторичные и третичные высокоэнергичные элементы, которые и создают основную опасность для летных экипажей. Очевидно, что на полярных широтах и на высоте эффект облучения сильнее. Поток высокоэнергичных частиц опасен не только для здоровья, но и для электроники.

Информация о потоке протонов с высокой энергией поступает с космических аппаратов SOHO при помощи коронографов LASCO-3. К примеру, ниже приведено изображение, полученное во время интенсивного коронального выброса массы 16 августа 2001 года, на котором хорошо видны заряженные частицы. Также ниже приведено изображение с LASCO-3 во время отсутствия солнечных бурь [14].

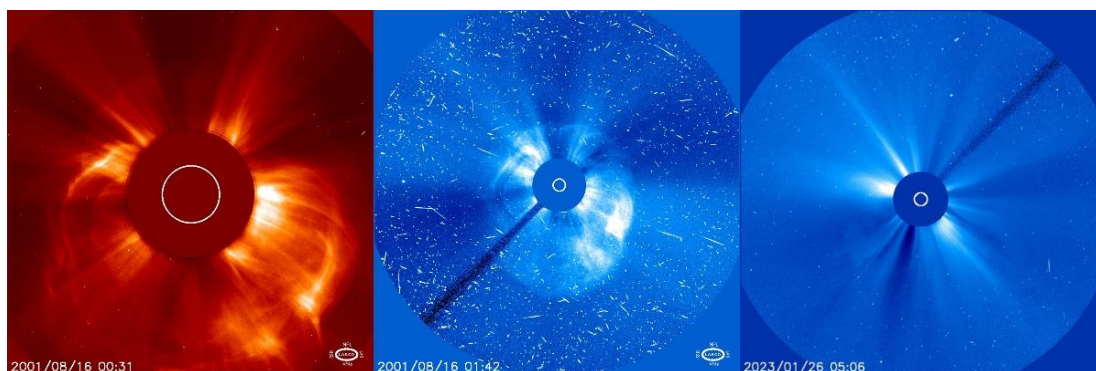


Рисунок 49 – Изображение коронального выброса масс и связанного с ним возросшего количество заряженных протонов. Справа — снимок состояния частиц при спокойном Солнце

На поверхности Земли также находятся специальные приборы, фиксирующие потоки заряженных частиц — это нейтронные мониторы. Данные детекторы регистрируют вторичные заряженные частицы. Когда более трех нейтронных мониторов улавливают увеличение радиации, значит, велик риск дополнительной дозы радиации на воздушном судне [12].

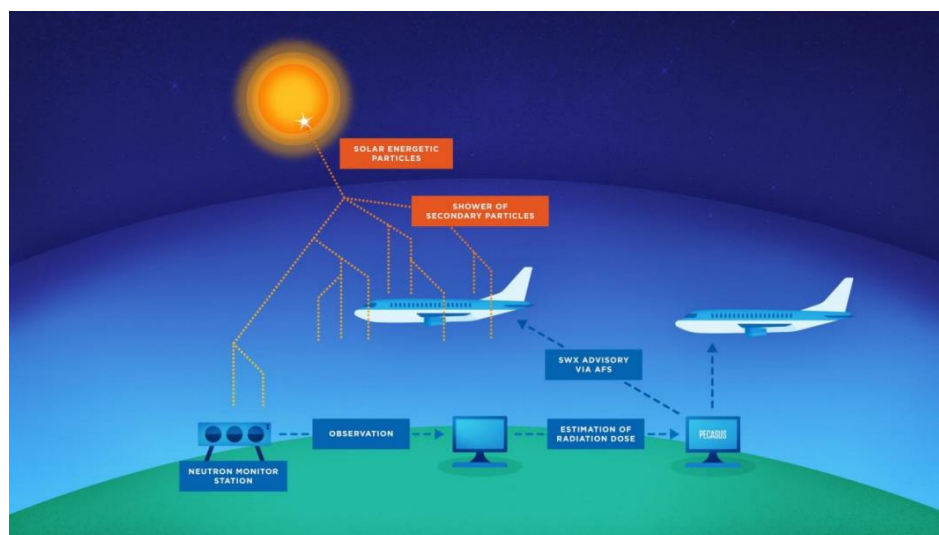


Рисунок 50 – Упрощенная схема воздействия солнечной активности на рост радиации

Очевидно, что больше всего подвержены влиянию радиации самолеты, совершающие трансполярные перелеты. Маршруты трансполярных перелетов пролегают через Северный Ледовитый океан, чаще всего связывают при этом

страны Азии и Северной Америки через обширное воздушное пространство нашей страны. Федеральное агентство воздушного транспорта подсчитало количество полетов, график приведен ниже. Резкий спад количества трансполярных перелетов связан с эпидемией коронавируса и неблагоприятной политической обстановкой.

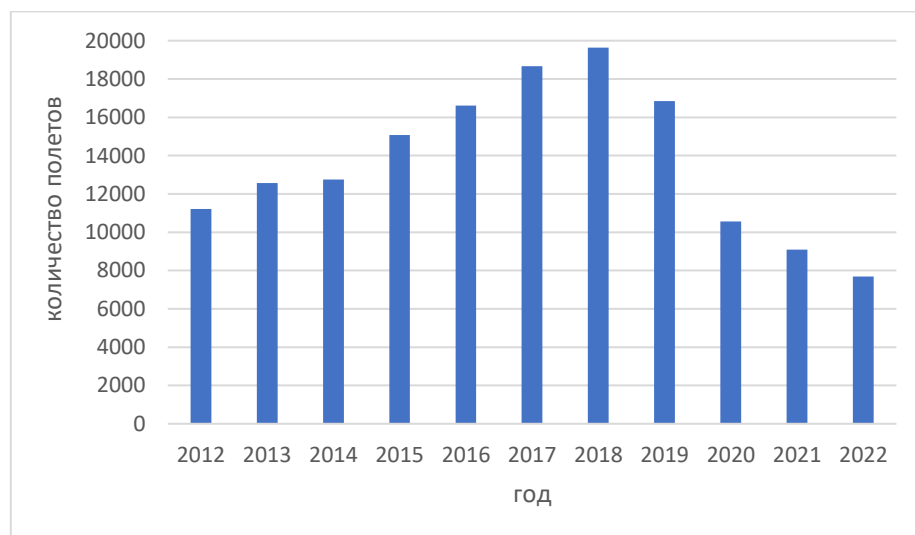


График 3 – Количество полетов по трансполярным маршрутам



Рисунок 51 – Примеры трансполярных воздушных трасс

Естественно, что трансполярные перелеты очень важны — они значительно экономят время в пути и деньги авиакомпаний. Стоит отметить, что обыденным для международного сотрудничества такие перелеты стали относительно недавно, с 2011 года. К примеру, перелет между Нью-Йорком и

Гонконгом через Северный полюс сокращается более чем на два часа. Но, как упоминалось ранее, значительно возрастает риск облучения экипажа, и если для единичного перелета при спокойной солнечной активности доза радиации находится на безопасном уровне, то для экипажа повторное облучение уже может представлять опасность. Интересно, что трансполярные перелеты в Южном полушарии практически не проводятся. Это связано с несколькими причинами: вблизи Антарктики гораздо меньше населения и меньше запасных аэропортов, а также попросту не так много перелетов, поэтому нет спроса на трансантарктические рейсы. К тому же, погодные условия Антарктике крайне непредсказуемы и неблагоприятны [10].

В 2010-ых годах в США, Японии, Франции и Германии были проведены исследования об облучении радиацией экипажей воздушных судов. Также была разработана специальная методика для расчёта допустимых доз за время полета, о которых мы поговорим позже. Международная комиссия по радиологической защите является регламентирующим органом, который разрабатывает для авиационных пользователей. Несмотря на то, что их рекомендации не носят обязательный характер, многие страны придерживаются их расчетов, приведенных в таблице ниже. Стоит отметить, что рассматриваются детерминированные последствия облучения, проявляющиеся в виде превышения погибших клеток над количеством образовавшихся, и стохастические — когда подвергшиеся радиации клетки не погибают, а изменяются или серьезно мутируют, однако при достаточном иммунитете последствия не столь критичны [9, 10].

Таблица 3 – Предельные дозы радиации

| Категории | Эффективные дозы |
|------------------|--|
| Профессиональные | Детерминированные: 150 мЗв — хрусталики глаз, 500 мЗв — 1 см ² кожная поверхность, 500 мЗв — руки и ноги, к примеру, на рентгене. |

| | |
|------------|--|
| | Стохастические: от 20 мЗв за год до 50 мЗв, но не более 100 мЗв за 5 лет, предельно допустимая за год 0,05 зВ. |
| Общие | Детерминированные: 150 мЗв — хрусталики глаз, 50 мЗв — 1 см ² кожа. Стохастические: 0,7 – 2 мЗв/год, |
| Беременные | 1 мЗв на эмбрион/плод. |

В целом, за перелет на самолете на расстояние 2400 км, человек получает дозу в 10 мкЗв одновременно — на средних широтах и при спокойной солнечной активности; 70 мЗв/год — столько получает человек, проживающий в кирпичном доме; 500 мЗв/год — предельная производственная доза радиации в России [9].

Федерация профсоюза летного состава России (ФПЛС) провело в 2012 году исследование о получаемой летным экипажем дозы радиации. Было выяснено, что цифры варьируются от 3,9 мкЗв до 80,3 мкЗв в зависимости высоты и широты полета за один рейс в одном направлении. В таком случае уже годовую дозу радиации можно получить, совершив всего восемь перелетов от Москвы до Певека (самого северного города, находящегося в Чукотском АО) и обратно. При этом на борту самолетов российских авиакомпаний нет официального дозиметра, и экипажи самолетов не относятся к рабочей категории «А» — то есть к тем, кто непосредственно работает с источниками облучения или, как в таблице выше, «профессиональной» категории. Космическое излучение и накопленная радиация также не учитываются. Единственные факторы риска, описываемые в трудовом соглашении экипажа, это неудовлетворительный состав воздуха, температурный дискомфорт, колебания давления, вибрация и авиационные шумы. К тому же нет четко оговоренных пределов нормы летных часов: она варьируется до 90-130 часов и более.

Средств защиты от радиации на бортах гражданских воздушных судов нет: корпус летательного аппарата и внутренняя обшивка не ослабляют проникающую радиацию на высоких эшелонах и особенно при возрастании

солнечной активности. Помимо здоровья, от облучения страдают электронная аппаратура, установленная в комплекции самолета. С ростом технического прогресса элементы авионики становятся меньше и компактнее, а значит, рост повреждений из-за космических лучей и вторичных энергичных частиц возрастает. Не стоит забывать и о сбоях команд в электронных системах.

Итак, имеется несколько расчетных моделей для контроля и прогнозирования уровня радиации. Одна из них принадлежит NASA: программа NAIRAS рассчитывает эффективную мощность дозы радиации для экипажа, исходящую от космических лучей и периодического солнечного излучения. NAIRAS представляет собой глобальные прогнозы в режиме реального времени на географической сетке $1^\circ \times 1^\circ$ и до высоты 90 км, с разрешением по вертикали 1 км. Прогнозы обновляются каждый час. Используются детерминированные модели, основанные на физике проникновения космических лучей сквозь магнитосферу Земли и нейтральную атмосферу без использования корректирующих коэффициентов.

NAIRAS удобна тем, что уделяет особое внимание солнечным космическим лучам во время геомагнитных спокойных условий, а также расчетам эффективной дозы в зависимости от высоты полетов коммерческой авиации и учету максимума и минимума солнечного цикла. Перенос частиц через магнитосферу параметризуется через отслеживание траектории заряженных протонов и электронов в динамически изменяющемся геомагнитном поле. Модель NAIRAS постоянно совершенствуется, более современные расчеты учитывают и атмосферный ливень заряженных частиц, инициируемый пионами и другими вторичными частицами. В качестве входных данных модели используются [15]:

❖ данные спутников ACE (Advanced Composition Explorer), полученные с монитора электронов, протонов и альфа-частиц, и спутника GOES, с датчика непрерывного мониторинга космической среды (SEM). Данные необходимы для получения параметров спектрального потока (осредненных за пять минут);

- ❖ данные о солнечном ветре со спутника ACE (скорость, плотность, интенсивность);
- ❖ данные о геомагнитном поле на основе модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field);
- ❖ данные с датчика температуры TS05;
- ❖ высота над уровнем моря;
- ❖ давление в зависимости от данных геопотенциальной высоты, часто с применением модели NRLMSIS.

Соответственно, выходными данными является показатели радиационного облучения. Модель зависит от времени. Ниже приведены примеры изображения вертикального профиля полета из Нью-Йорка в Лондон за 19 октября 2015 с наглядным показателем того, как с высотой увеличивается эффективная доза облучения (слева) и уровни радиационного облучения на северном полюсе за ту же дату (справа).

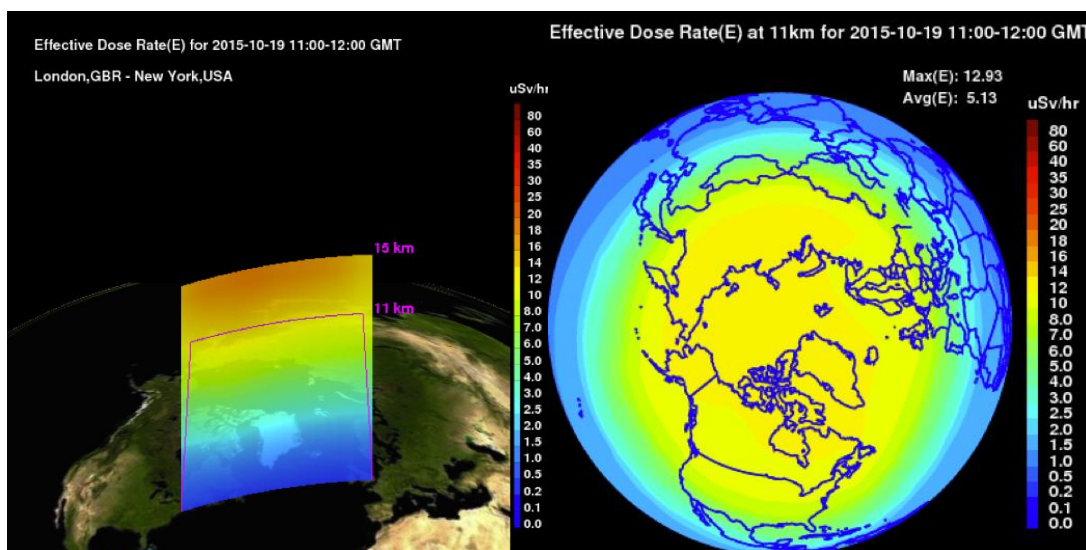


Рисунок 52 – Графические изображения модели NAIRAS

Также существует модель CARI-6 — это специализированная компьютерная программа, разработанная в Гражданском аэрокосмическом медицинском институте при Федеральном авиационном управлении гражданской авиации, предназначенная для расчета эффективной дозы

галактического космического излучения на воздушном судне между двумя любыми аэропортами. Программа способна учитывать изменения высоты и географического положения за время маршрута. CARI-6 рассчитывает эффективную мощность в любой точке атмосферы до высоты 19 км и не требует мощного оборудования — ее можно запустить практически с любого компьютера. CARI-6 разработана в 2004 году и использует в принципе работы приближение суперпозиции для обработки данных об альфа-частицах и более тяжелых ионов, присутствующим в первичном потоке космических лучей в верхней части атмосферы, и таблицы гелиоцентрического потенциала. С увеличением высоты приближение суперпозиции становится менее точным [15].

На подобном принципе действует отечественная программа от ФГБУ «ИПГ». Помимо даты и пунктов вылета-прилета можно также указать высоту полета, скорость и солнечную активность. К примеру, за 19 октября 2015 года за время перелета Нью-Йорк – Лондон, которое составило около 7,5 часов, было получена доза в 40,55 мкЗв, что в целом совпадает с данными от NAIRAS [13].

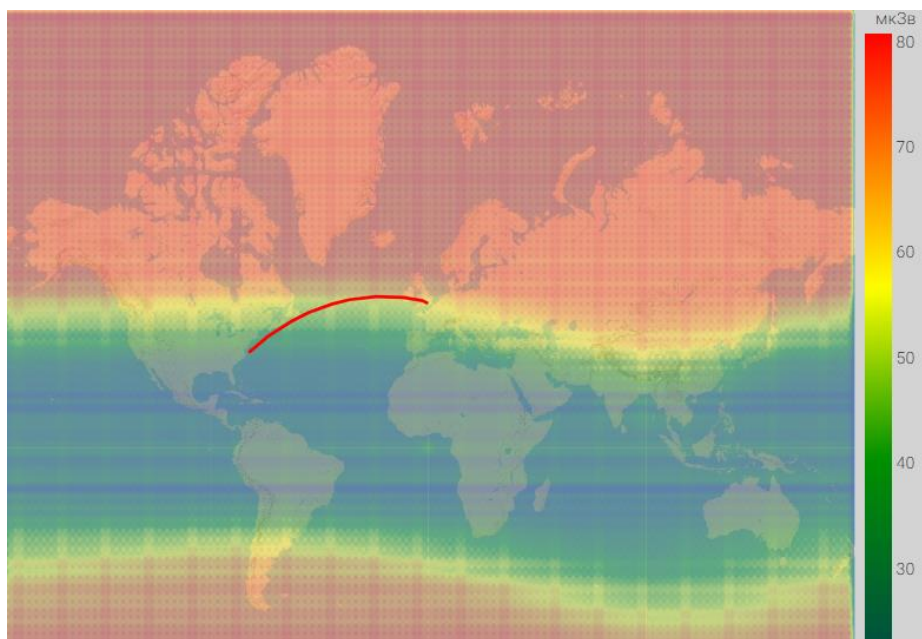


Рисунок 53 – Расчет дозы радиации по модели ИПГ им. Фёдорова

2.8 Информация о космической погоде для авиационных пользователей

В интересах авиации для прогноза космической погоды необходимо знать несколько параметров: индекс геомагнитной и солнечной активности (чаще всего K_p , A_p и Dst), информация с глобальных ионосферных карт, данные о высокозаряженных частицах, полученные с нейтронных мониторов, характеристики магнитного поля, уровень поглощения в ППШ и в D-слое ионосферы, данные о потоках частиц в радиационном поясе и на высоких широтах и о потоках частиц, ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, об активных областях, солнечных пятнах, вспышках, ветре и корональных выбросах масс, полученные с искусственных спутников.

Существует несколько пороговых значений, предназначенных для выпуска консультативных сообщений о космической погоде. Сообщения выпускаются тогда, когда возмущения умеренные или сильные. Для высокочастотной связи важна максимально применимая частота (MUF) — это наибольшая частота, которая в данный промежуток времени способна отразиться от ионосферы. MUF зависит от времени года и суток и, естественно, от солнечной активности. Измеряется в процентах ухудшения.

Для спутниковой навигации важно значение вертикального полного электронного содержания. Данный параметр необходим как показатель степени изменения ионосферы и ее состояния [9].

Таблица 4 – Пороговые значения от ИКАО для выпуска SWX

| Явление | | Умеренное | Сильное |
|--------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|
| Нарушение ВЧ-связи | Уменьшение MUF | 30% | 50% |
| | Мощность рентгеновского излучения | 10^{-4} нм | 10^{-3} нм |
| | Авроральное поглощение | $K_p = 8$ | $K_p = 9$ |

| | | | |
|------------------------|--------------------------|-----------|-----------|
| Радиационное облучение | Мощность дозы | 30 мкЗв/ч | 80 мкЗв/ч |
| Спутниковая навигация | Вертикальное ПЭС | 125 ПЭС | 175 ПЭС |
| | Фазовые сцинтилляции | 0,4 рад | 0,7 рад |
| | Амплитудные сцинтилляции | 0,5 | 0,8 |

В зависимости от опасности солнечного возмущения и степени его влияния на Землю и в частности на полеты воздушных судов Центры полетной информации (ЦПИ), Районные, Региональные или Зональные диспетчерские центры (РДЦ, РегДЦ, ЗДЦ соответственно), а также авиакомпании и непосредственно сами пилоты могут принимать следующие решения:

- ❖ изменить маршрут или высоту полета;
- ❖ изменить план полета;
- ❖ совершить экстренную посадку;
- ❖ по возможности изменить диапазон используемых частот;
- ❖ дополнительно уточнить координаты местоположения при сбое систем спутниковой навигации.

Для авиационных пользователей информация о космической погоде поступает из глобальных консультативных центров в виде сообщений о космической погоде. Центры обязаны взаимодействовать между собой для корректного распространения и выпуска сообщений, а также для качественного предоставления информации метеорологическим органам, которые, в свою очередь, передают данные летным экипажам. Консультативные сообщения о космической погоде выпускаются на английском языке максимально кратким и емким открытым текстом по утвержденным ИКАО правилам. При ухудшении характеристик высокочастотной связи выпускается сообщение с маркировкой «HF COM», при сбоях в глобальной спутниковой навигационной системе используется сокращение «GNSS», при повышенном уровне радиационной опасности — «RADIATION».

Консультативные сообщения информируют о типе воздействия (HF COM, GNSS, RADIATION), о его интенсивности (MOD — умеренная или SEV — сильная), о его начале и продолжительности, а также о пространственной протяжённости на ближайшие сутки. Для пространственной протяженности используются описание в виде широтных полос со следующими сокращениями [9]:

Таблица 5 – Сокращения для консультативных сообщений

| Сокращение | Диапазон, ° |
|---|------------------------------|
| Высокие широты северного или южного полушария (HNH, HSH) | N9000 – N6000, S6000 – S9000 |
| Средние широты северного или южного полушария (MNH, MSH) | N6000 – N3000, S3000 – S6000 |
| Экваториальные широты северного или южного полушария (EQN, EQS) | N3000 – N0000, S0000 – S3000 |
| Долгота (по часовой стрелке) | W000-W180 |
| Широта (с севера на юг) | E000-E090 |
| Освещенная сторона Земли | DAYLIGHT SIDE |
| Выше эшелона | ABV FLnnn |

Отметим, что при геомагнитных бурях не используется единственная полоса, так как данное явление происходит на двух полюсах. Если геомагнитная буря достаточно сильная, ее влияние может распространиться на экваториальные широты в виде умеренного ухудшения характеристик высокочастотной и навигационной связи, тогда как для средних и высоких ухудшения, скорее всего, будет сильное. В таком случае выпускаются два консультативных сообщения.

При ионосферных бурях чаще всего происходит ухудшение спутниковой навигационной связи, причем возмущения локализованы и могут

быть описаны с помощью четырёхсторонней трапециевидной фигуры. Тогда используются не только широтные, но и долготные координаты. Солнечные вспышки ухудшают радиосвязь и спутниковое позиционирование только на освещенной Солнцем стороне Земли. В редких случаях, особенно при повышении уровня радиации, может указываться сокращение выше определенного эшелона. При изменении интенсивности ухудшаемого явления или его прекращении выпускается обновлённое консультативное сообщение, но сообщения SWX выпускаются как минимум каждые шесть часов, пока опасное гелиогеофизическое явление длится или прогнозируется. Сообщения, выпущенные в целях проверки каналов связи, отмечаются пометкой «TEST».

При получении консультативного сообщения отдел автоматической системы передачи данных «Авиаметтелекома Росгидромета» передает информацию в УГМС, ГАМЦ и филиалы для дальнейшего распространения авиационным пользователям. Согласно ФАП-60 и 78 поправке, консультативное сообщение должно включаться в полетную документацию, а также передаваться органам ЕС ОрВД, к примеру, через ГГС, почту или синоптические презентации [12].

Информацию, необходимую для авиации, можно подразделить на несколько фаз. На предполетной фазе информацию о суточном прогнозе космической погоды необходимо предоставить в центр управления полетами (ЦУП). Это данные об уровне солнечной активности, о рентгеновском излучении, о магнитной обстановке, об оптимальных радиочастотах и о прогнозируемых потоках протонов и электронов. С момента взлета самолета и до посадки наблюдаемая информация о состоянии космической погоды должна быть доступна экипажу в режиме реального времени. При внезапном возникновении ОГЯ данные о нем следует незамедлительно сообщать командиру воздушного судна и в ЦУП. После посадки в ЦУП предоставляется анализ космической погоды, полученный при перелете [3].

На рисунке 54 приведена схема, составленная Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA),

наглядно демонстрирующая степень влияния космической погоды на воздушное судно при следовании трансполярным маршрутом [3].

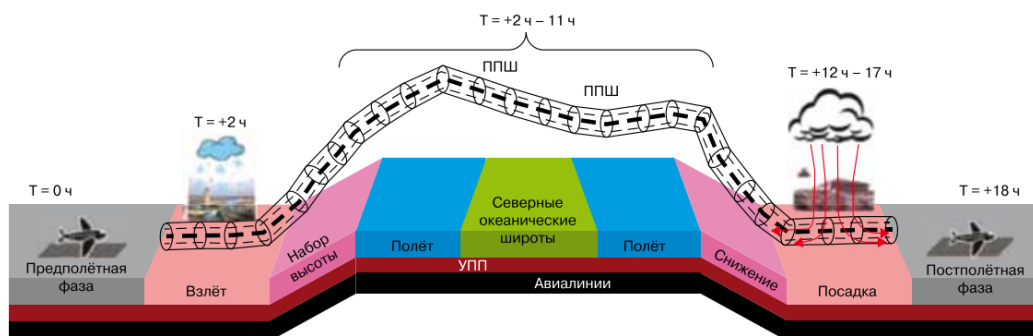


Рисунок 54 – Схема влияния космической погоды на воздушное судно при следовании трансполярным маршрутом

2.9 Примеры консультативных сообщений

Ниже приведен пример консультативного сообщения о космической погоде. Данное сообщение получено в 21:35 UTC 31 июля 2021 года, выпущено Финским метеорологическим институтом в 21:32 UTC того же числа глобальным центром космической погоды PECASUS. Это 37 сообщение за 2021 год. Сообщение выпущено о сильном ухудшении спутниковой навигации, неблагоприятное явление наблюдалось в 20:25 UTC 31 числа в пределах 5° западной долготы и 35° восточной. В последующие сутки ухудшение GNSS не ожидается. В ремарке дана краткая характеристика причин возникновения ОГЯ: возмущение космической погоды происходит в данный момент и выражено в виде ионосферной бури, влияющей на характеристики спутниковой связи. Возможны потери сигнала и/или ухудшение характеристик позиционирования и времени. Выпуск следующего сообщения ожидается в 02:52 UTC 1 августа 2021 года.

21:35:20 31-07-2021 Leng=594 Chan=AFTN
FNXX01 EFKL 312134
EFKL 312134
SWX ADVISORY
DTG: 20210731/2132Z
SWXC: PECASUS
ADVISORY NR: 2021/37
SWX EFFECT: GNSS SEV
OBS SWX: 31/2025Z HNH W005 - E035
FCST SWX +6 HR: 01/0300Z NOT AVBL
FCST SWX +12 HR: 01/0900Z NOT AVBL
FCST SWX +18 HR: 01/1500Z NOT AVBL
FCST SWX +24 HR: 01/2100Z NOT AVBL
RMK: SPACE WEATHER EVENT (IONOSPHERIC DISTURBANCE)
IN PROGRESS. IMPACT ON GNSS PERFORMANCE POSSIBLY LEADING
TO LOSS OF GNSS SIGNALS AND/OR DEGRADATION OF TIMING AND
POSITIONING PERFORMANCE.
NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20210801/0252Z=

Рисунок 55 – Пример консультативного сообщение
о космической погоде (GNSS)

Еще один пример консультативного сообщения приведен в рисунке 56. Сообщение выпущено в 19:08 UTC 15 октября 2021 года глобальным консультативным центром-консорциумом ACFJ, конкретно при дежурстве австралийских специалистов. Сообщение получено в 19:09 UTC, об умеренном ухудшение характеристик высокочастотной связи. Воздействие ОГЯ наблюдается с 18:52 UTC того же дня по всему северному полушарию от 00° до 60° восточной долготы. В ближайшие сутки явление не прогнозируется. В ремарке говорится о том, что космическая погода влияет на диапазон высоких частот коротковолновой связи, на низкие частоты ОГЯ оказывает меньше влияние. Возможны области, где ухудшение характеристик

высокочастотной связи сильное. Следующее сообщение ожидается в 01:00 UTC 16 октября 2021 года.

```
19:09:31 15-10-2021 Leng=697 Chan=AFTN
FNXX02 YMMC 151908
YMMC 151908
SWX ADVISORY
DTG:      20211015/1908Z
SWXC:     ACFJ
ADVISORY NR: 2021/34
SWX EFFECT: HF COM MOD
OBS SWX:   15/1852Z HNH MNH EQN E000 - E060
FCST SWX +6 HR: 16/0100Z NO SWX EXP
FCST SWX +12 HR: 16/0700Z NO SWX EXP
FCST SWX +18 HR: 16/1300Z NO SWX EXP
FCST SWX +24 HR: 16/1900Z NO SWX EXP
RMK:      SPACE WEATHER EVENT (MAXIMUM USABLE FREQUENCY
          DEPRESSION) IN PROGRESS IMPACTING HIGHER HF COM
          FREQUENCY BAND. LOWER FREQUENCIES MAY BE LESS
          IMPACTED. ISOLATED AREAS OF SEV HF COM DEGRADATION
          POSSIBLE.
NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20211016/0100Z=
```

Рисунок 56 – Пример консультативного сообщение (HF COM)

Консультативные сообщение о радиационной опасности практически не выпускаются и чаще всего встречаются в тестовом виде. Ниже приведен пример, взятый с сайта ИКАО. Сообщение было выпущено в 03:00 UTC 19 апреля 2017 года, то есть еще до создания глобальных центров космической погоды и когда сама концепция консультативных сообщений только разрабатывалась — поэтому вместо индекса с названием центра написано TBD. В SWX указан умеренной уровень радиационного облучения на 03:00 UTC той же даты. В качестве местоположения указаны высокие северные и южные широты, что свидетельствует о гипотетической геомагнитной буре, а также долготы от 180° восточной до 180° южной (полное перекрытие

полярных шапок) и вертикальные координаты выше эшелона 370 (около 11 км). Дальнейшее воздействие ОГЯ не прогнозируется. В ремарке указано, что продолжительность явления короткая и несколько превышен порог допустимых значений радиационного облучения. Следующее сообщение не будет выпущено, так как явление окончено.

(Заголовок сообщения)

SWX ADVISORY

DTG:

20170419/0300Z

SWXC:

(TBD)

ADVISORY NR:

2017/2

NR RPLC:

2017/1

SWX EFFECT:

RADIATION MOD

OBS SWX:

19/0300Z HNH HSH E18000-W18000 ABV FL370

FCST SWX + 6 HR:

19/0900Z NO SWX EXP

FCST SWX + 12 HR:

19/1500Z NO SWX EXP

FCST SWX + 18 HR:

19/2100Z NO SWX EXP

FCST SWX + 24 HR:

20/0300Z NO SWX EXP

RMK:

RADIATION AT AIRCRAFT ALTITUDES ELEVATED BY
SMALL ENHANCEMENT JUST ABOVE PRESCRIBED
THRESHHOLD. DURATION TO BE SHORT-LIVED. SEE
WWW.SPACEWEATHERPROVIDER.COM.

NXT ADVISORY:

NO FURTHER ADVISORIES

Рисунок 57 – Пример консультативного сообщения (RADIATION)

3. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ПОЛЕТЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

3.1. Исследование двадцать пятого солнечного цикла на основе архива сообщений о космической погоде за сентябрь 2020 – январь 2023 гг.

Синоптики узнают о возмущениях космической погоды с помощью консультативных сообщений. Консультативные сообщения (SWX) поступают в АСПД, откуда оперативный работник может их посмотреть с помощью специальных индексов глобальных центров космической погоды: EFKL (Хельсинки), EGRR (Великобритания), LFPW (Тулуза), YMMC (Мельбурн), KWNP (США), UUAG (ИПГ им. Фёдорова), ZBBV (Китай) [12].

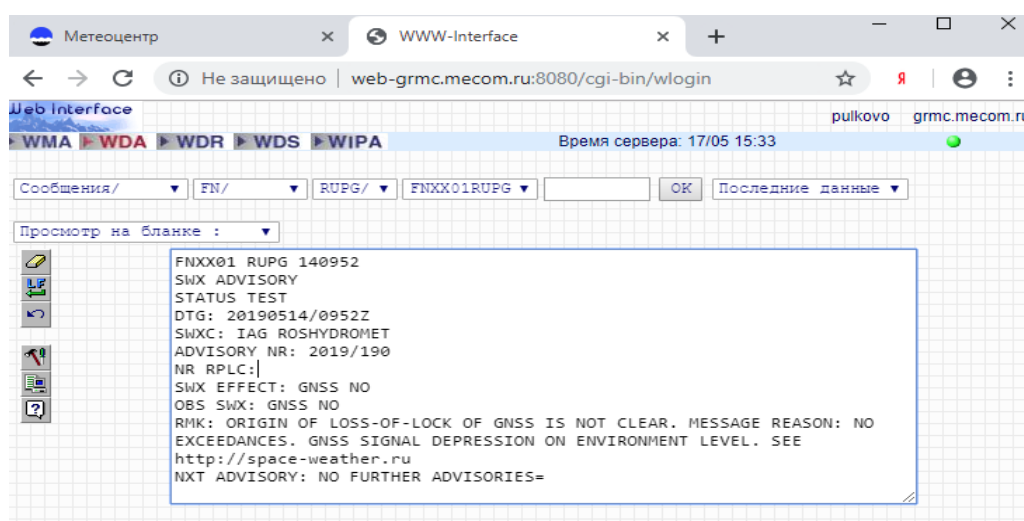


Рисунок 58 – Консультативное сообщение на сайте АСПД

Кроме того, синоптики могут посмотреть информацию о возмущениях в космической среде через АИС (Автоматизированная информационная система) «МетеоКонсультант» от ИРАМ. «МетеоКонсультант» является программой, способствующей быстрому получению информации через каналы сети АСПД, чаще всего установленной на компьютерном рабочем

столе синоптика. С помощью данной программы совершается не только получение и архивация данных в коде METAR, TAF, SIGMET, AIRMET и мониторинг консультативных сообщений, в том числе и о вулканическом пепле и выбросе радиоактивных материалов, но и подготовка и печать полетной документации [12].

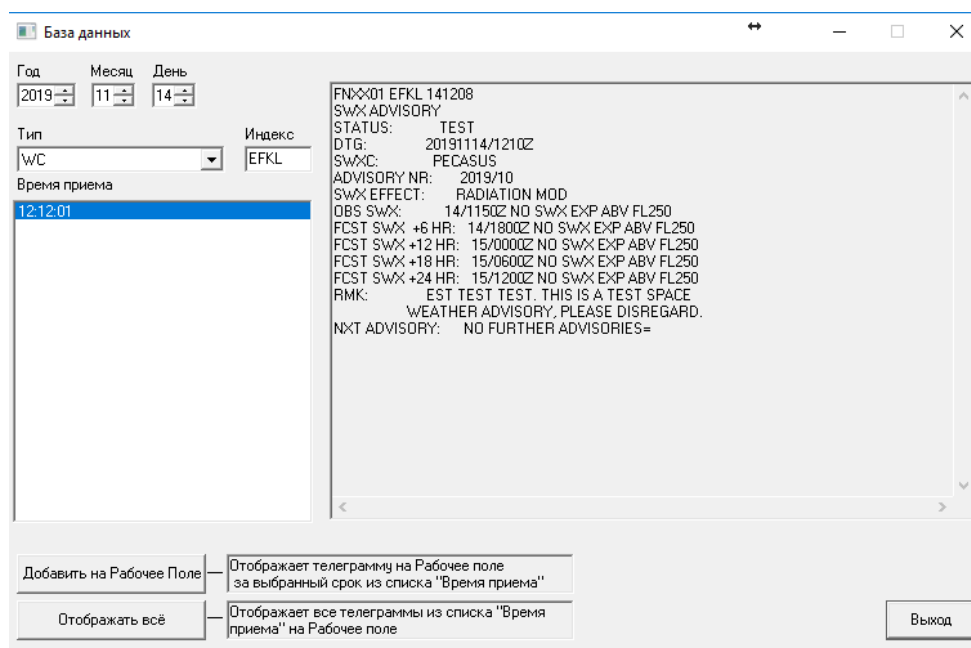


Рисунок 59 – Просмотр информации о SWX в АИС
«МетеоКонсультант»

Консультативные сообщения согласно приказу АМТК «О предоставлении консультативных сообщений о космической погоде» от 18.11.2019 необходимо включать в полетную документацию и при устной консультации обращать на выпущенное сообщение внимание эксплуатантов и членов лётных экипажей; в презентации для диспетчерских составов и по электронной почте руководителям полетов.

На основе полученных сообщений о космической погоде был создан архив за период сентябрь 2020 – январь 2023. Архив является не полным: отсутствуют данные за ноябрь и декабрь 2020, декабрь 2021, январь и февраль 2022. Этому есть несколько объяснений. Во-первых, сообщений SWX нет в свободном доступе, их не публикуют в веб-ресурсах. Во-вторых, архив,

находящийся в АИС «МетеоКонсультант», не превышает ближайшие четыре месяца. В-третьих, одной из причин также может быть и то, что не все аэропорты, АМЦ и АМСГ ведут архивы сообщений и, не смотря на поправки в ФАПах, не включают в полетную документацию. В-четвертых, из-за относительной новизны данной системы оповещений, сообщения 2019-2020 годов отсутствуют в российской АСПД.

На графике, приведенном ниже, четко отслеживается неравномерное распределение опасных гелиогеофизических явлений по сезонам. Было замечено, что космическая активность в летние периоды снижена. Предположительно, это связано с тем, что в зимний период Солнце ближе к Земле именно в северном полушарии — там, где интенсивность полетов больше, а также где располагаются практически все глобальные центры SWPC, за исключением Австралии. В дальнейшем теория о том, что консультативные сообщения чаще выпускаются по северному полушарию, подтверждается графиком 4.

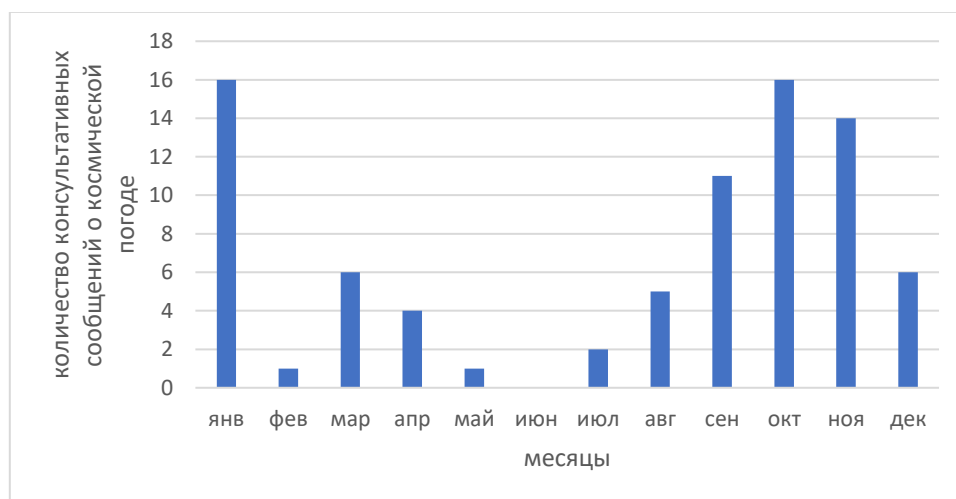


График 4 – Распределение количества консультативных сообщений за период сентябрь 2020 – январь 2023 гг.

Стоит отметить и то, что за период сентябрь 2020 – апрель 2021 большинство сообщений выпускались в тестовом режиме. Более того,

несколько изменился и формат самих сообщений: они стали выпускаться чаще, к тому же в строке РМК информация дается четче, полнее и однообразнее по формату, что определенно легче воспринимается авиационными пользователями. Легко предположить, что изменения в лучшую сторону происходят из-за того, что постепенно консультативные сообщения входят в привычный круг деятельности синоптиков, работающих в SWPC.

На диаграмме 1 показано распределение опасных гелиогеофизических явлений на основе созданного архива. Чаще всего сообщения выпускались на умеренное ухудшение высокочастотной связи (34%). Сообщения о разной степени ухудшении спутниковой навигации занимают практически равные проценты (умеренное 27%; сильное 26%). Реже всего выпускались сообщения на сильные ухудшения высокочастотной связи, что может быть связано с низкой солнечной активностью в двадцать пятом солнечном цикле и редко возникающими сильными солнечными вспышками или корональными выбросами масс. Ухудшения спутниковой навигации связаны с ионосферными штормами, более локальным явлением, вызываемым солнечными вспышками, которые, к тому же, чаще всего возникают на освещенной Солнцем стороне Земли и легко предсказуемы за счет современных глобальных ионосферных моделей.

Стоит отметить, что за период сентябрь 2020 – январь 2023 не было выпущено ни одного сообщения о повышенной радиационной опасности. Действительно, потоки ГКЛ и СКЛ не были столь интенсивны, что подтверждается информацией с веб-ресурса от NASA. Однако есть и другая теория, что, несмотря на возможно повышенный радиационный фон, консультативные сообщения на данное явление предпочитают не выпускать, чтобы не вызывать панику среди пассажиров авиакомпаний и летных экипажей, так как в ином случае авиаперевозки могут понести убытки.

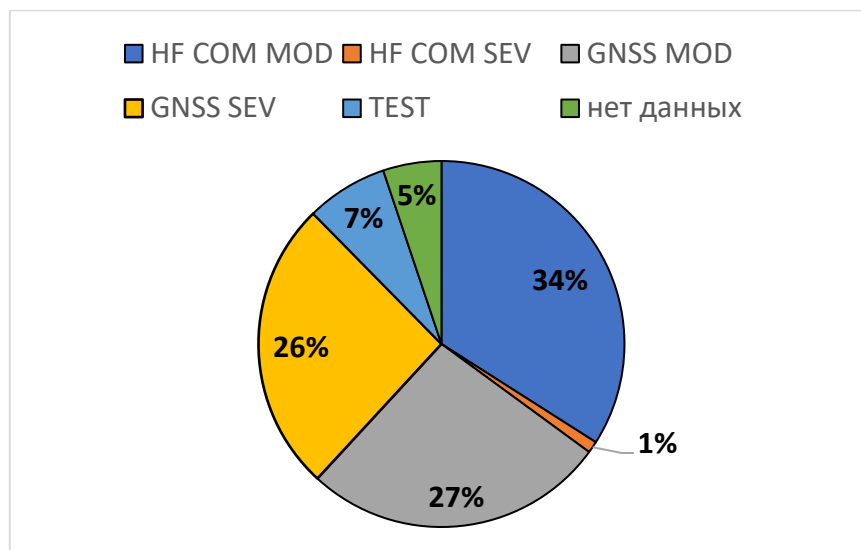


Диаграмма 1 – Распределение описанных в консультативных сообщениях ОГЯ за период сентябрь 2020 – январь 2023 гг.

Распределение описанных в консультативных сообщениях ОГЯ за период сентябрь 2020 – январь 2023 года по зонам их возникновения представлено на диаграммах 2 и 3. Как упоминалось ранее, частота выпуска сообщений SWX по северному полушарию (62%) скорее всего связана с высокой интенсивностью полетов и трансполярными перелетами. Не трудно заметить, что чаще всего консультативные сообщения выпускались по высоким широтам (40%), как наиболее уязвимым для солнечной активности из-за особенностей магнитного поля Земли и радиационного пояса. Отметим, что при геомагнитных бурях явление происходит на двух полюсах. С незначительной разницей в процентах сообщения выпускались по экваториальным (30%) и средним (28%) широтам — так как при высокой активности Солнца в виде солнечных вспышек и СМЕ обычно затрагиваются обширные широтные пространства нашей планеты. Термин «освященная сторона» или «дневная» применялся к высокочастотной связи, так как солнечные вспышки ухудшают радиосвязь и спутниковое позиционирование только на освещенной Солнцем стороне Земли.

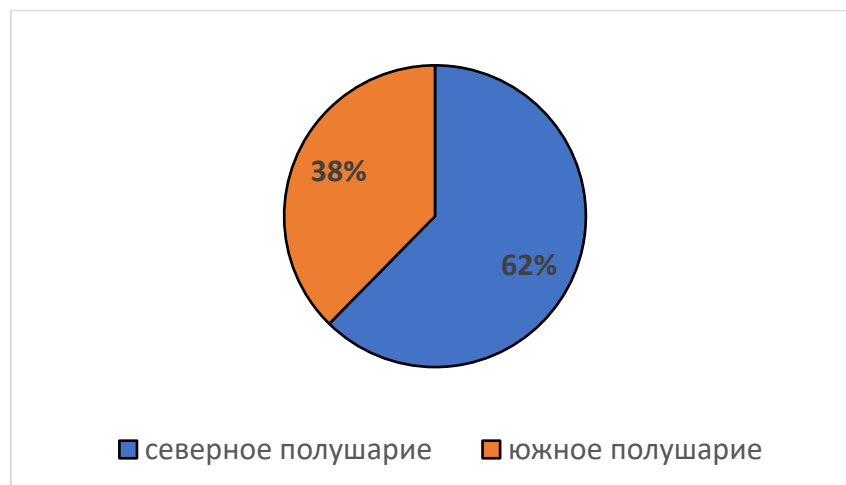


Диаграмма 2 – Распределение ОГЯ по полушарию за период сентябрь 2020 – январь 2023 гг.

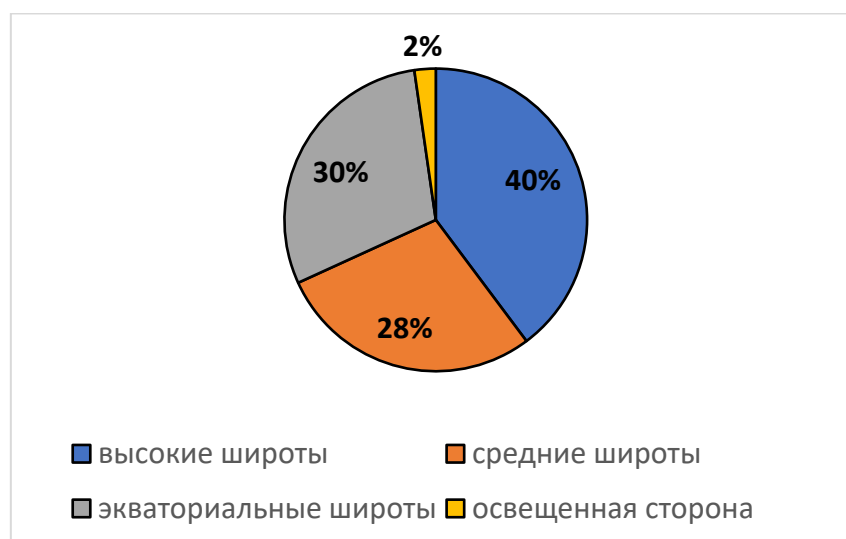


Диаграмма 3 – Распределение ОГЯ по зонам возникновения за период сентябрь 2020 – январь 2023 гг.

Рассмотрим несколько графиков, отображающих динамику активности солнца в двадцать пятом солнечном цикле — то есть в текущем. На графике 2 представлено количество солнечных пятен: среднемесячное и ежемесячное усредненное, а также прогноз на будущее до июля 2025 года согласно данным ISES. Очевидно, что цикл солнечной активности движется к своему максимуму, так как чем больше солнечных пятен, тем больше областей, в которых потенциально могут возникнуть солнечные вспышки и корональные

выбросы масс. Стоит также отметить, что конец 2022 – начало 2023 уже отметились сильным увеличением активности Солнца [20,21].

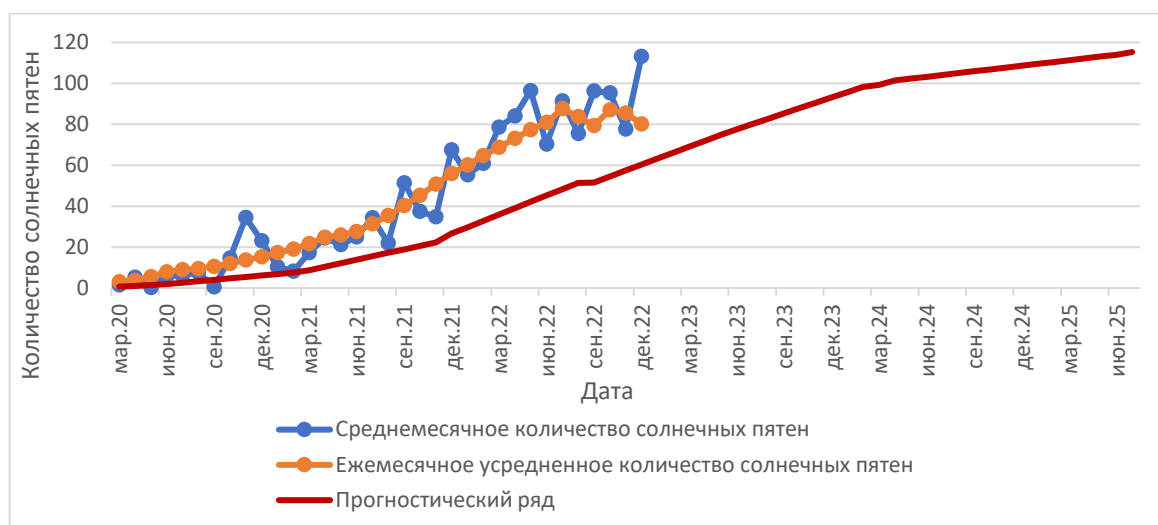


График 5 – Количество солнечных пятен в 25 солнечном цикле

Для сравнения ниже приведен график последних солнечных циклов. Сравнивая общую тенденцию, не трудно убедиться, что двадцать пятый цикл прогрессируют и постепенно движется к своему максимуму. График 3 взят с сайта Королевской Бельгийской Обсерватории, Брюссель. Также можно заметить, что столетний солнечный цикл, напротив, находится в относительном минимуме, что подтверждается меньшей солнечной активностью относительно предыдущих циклов [21].



График 6 – Солнечные циклы

Далее рассмотрим количество солнечных вспышек различной интенсивности в год, опять же рассматривая только двадцать пятый цикл. Данные взяты на основе архива SWPC NOAA. Приведен также прогноз на 2023 год. Стоит отметить, что по сравнению с 2020 годом, количество солнечных пятен увеличилось почти в 250 раз, однако вспышечная активность сильнее проявлялась в 2021 году. Более того, в 2021 году было зафиксировано 398 вспышек С-класса, 27 вспышек М-класса и 2 вспышки Х-класса. По прогностическим данным ISES в 2023 году ожидается 224 вспышки С-класса, 39 вспышек М-класса и 3 вспышки Х-класса несмотря на ожидаемое малое количество солнечных пятен (136 штук) [16].

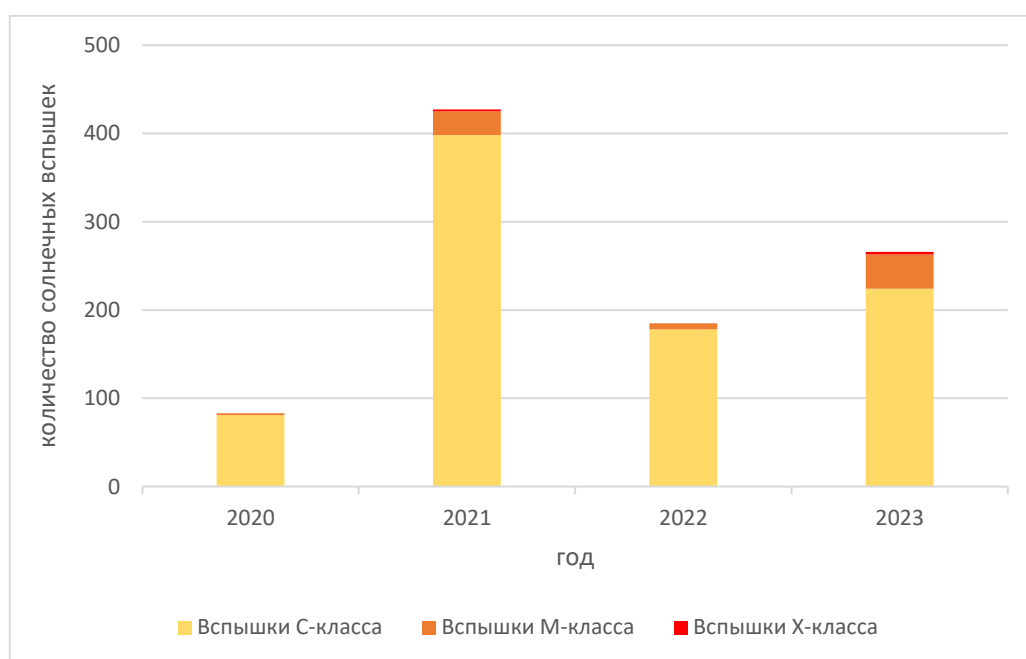


График 7 – График количества солнечных вспышек различных классов в течение 25 солнечного цикла

На приведенном ниже графике изображено количество солнечных вспышек различной интенсивности в течении января 2023 года. Как отмечалось ранее, в январе солнечная активность проявилась в виде нескольких вспышек. В этот период были выпущены консультативные сообщения о влиянии на спутниковую связь от сильного до умеренного. В

данном случае 10 января 2023 года, когда происходило больше всего вспышек, также отмечился максимум количества солнечных пятен [16].



График 8 – Количества солнечных вспышек за январь 2023 г.

На графике 6 приведено количество дней в году, когда наблюдались геомагнитные бури, согласно окончательному Кр-индексу, представленному на сайте GFZ Потсдам. По диаграммам не трудно заметить увеличение количества бурь, что соответствует приближение солнечного цикла к своему максимуму. Геомагнитных бурь интенсивностью G4 было крайне мало, всего одна в 2021 году, что соответствует общей тенденции количества солнечных вспышек на Солнце, представленной на графике 4. Бурь интенсивностью G5 не наблюдалось. К слову, такие бури крайне редки, и в последний раз фиксировались в единожды в 2000-ом году и дважды в 2003 году [21].

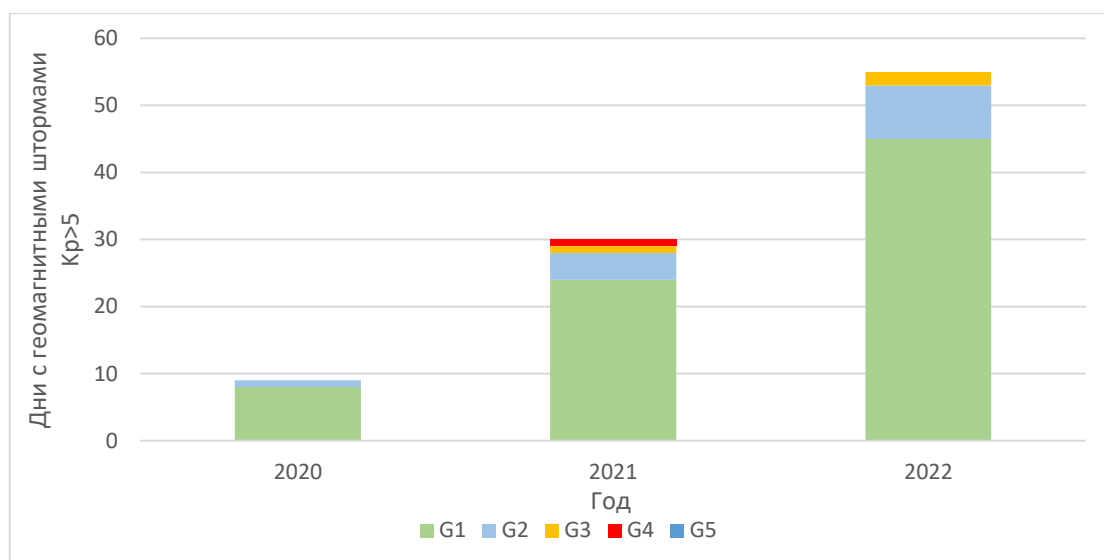


График 9 – Количество дней в году с геомагнитными бурями

В исследовательской работе с особой внимательностью рассматриваются дни, в которые были выпущены консультативные сообщения. Рассматривались два принципиально противоположных состояния магнитосферы: сильно возмущенное и крайне спокойное. Степень возмущенности магнитосферы оценивалась с помощью трехчасовых значений индексов K_p и A_p , взятых с сайта Немецкого исследовательского центра наук о Земле (GFZ Потсдам). Было выяснено, что за период сентябрь 2020 – январь 2023 насчитывается несколько дней с довольно высокими показателями индексов. За критические значения брались индексы $K_p > 4$ и $A_p > 50$. Очевидно, что индексы коррелируют между собой, так как имеют общую основу в виде входящих данных. Красными крестами обозначены дни, когда были выпущено консультативное сообщение или серия консультативных сообщений, так как зачастую возмущения на поверхности Солнца длятся несколько дней. Наглядно показано, что сообщения всегда были связаны с пересчитанными повышенными магнитными индексами. Особенно важно то, что индексы K_p и A_p не прогностические, а итоговые за год согласно исследованиям GFZ. Это подтверждает обоснованность выпуска консультативных сообщений [21].

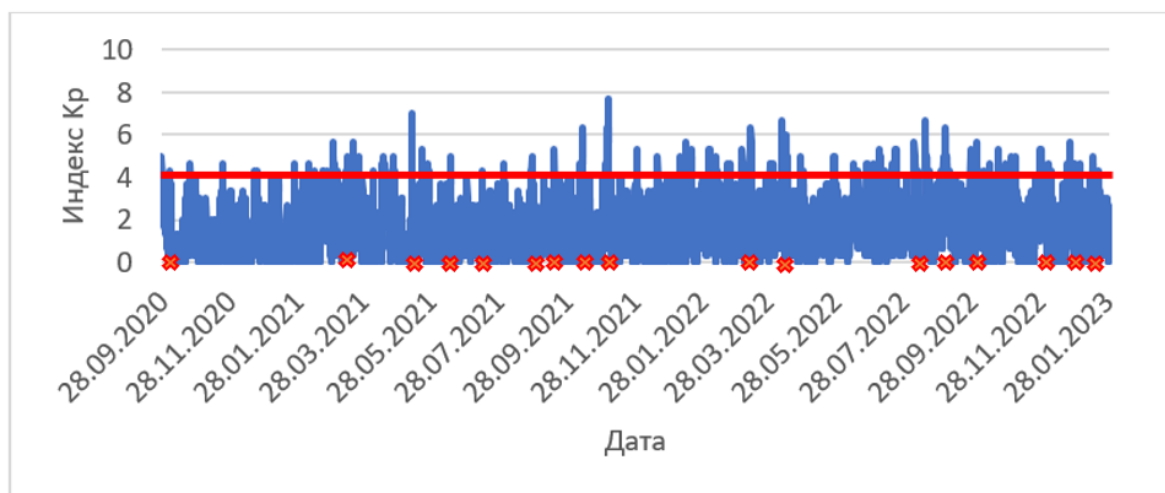


График 10 Значения индекса Кр за период
сентябрь 2020 – январь 2023 гг.

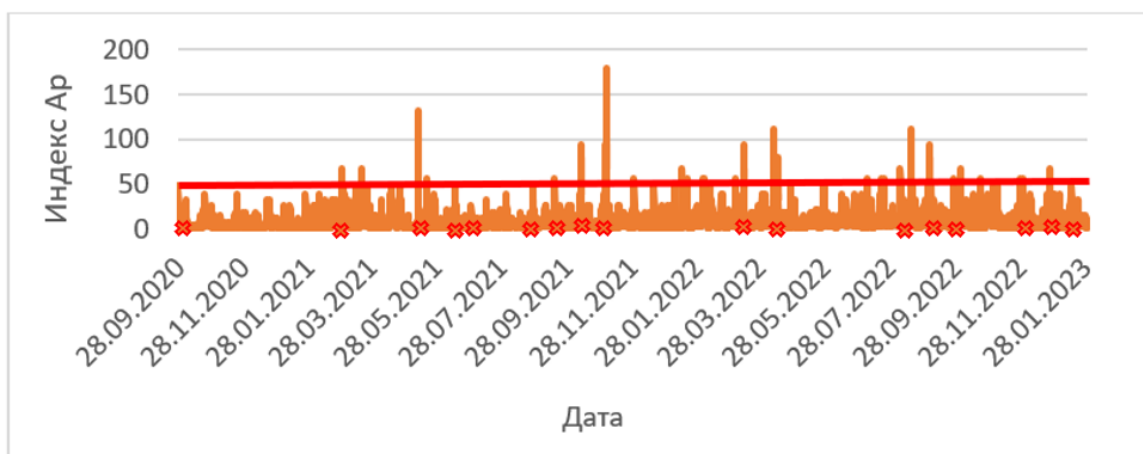


График 11 Значения индекса Ар за период
сентябрь 2020 – январь 2023 гг.

Наиболее интересен пик, отчетливо выделяющийся на графиках Кр и Ар-индексов. Это событие, произошедшее 4 ноября 2021 года (максимальное значение индекса Кр = 7,667; индекс Ар = 179). Во время данной солнечной активности были выпущены сообщения о космической погоде.

3.2 Исследование влияния космической погоды на высокочастотную связь на основе консультативных сообщений за 04 ноября 2021 г.

Самая известная солнечной бури двадцать пятого солнечного цикла произошла 3 ноября 2021 года и была связана с солнечной вспышкой класса M1.7, повлекшей за собой мощный выброс корональных масс. Высокоскоростной поток, связанный с солнечным ветром, вызвал резкий спад плотности и интенсивности галактических космических лучей, согласно данным нейтронного монитора, установленного в Новосибирске. Небольшое повышение перед резким спадом ГКЛ связано с фронтом ударной волны [11].

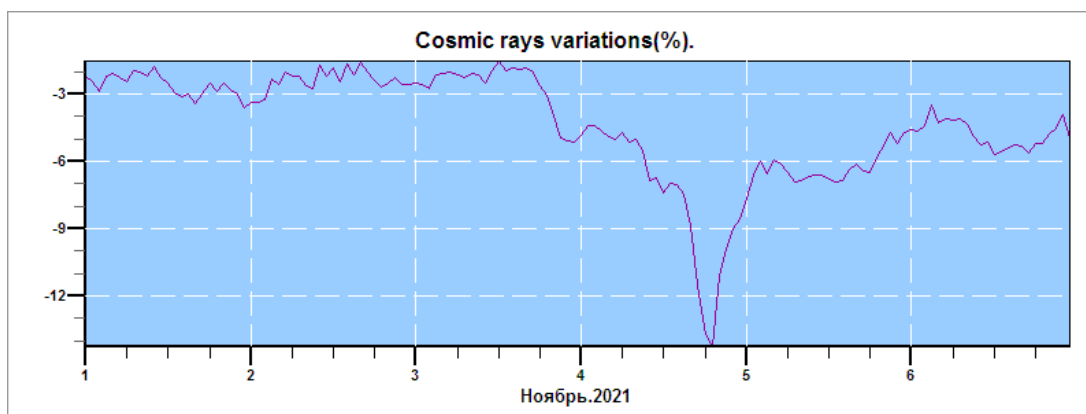


Рисунок 60 – Поток ГКЛ в ноябре 2021 г.

Центр прогнозирования космической погоды NOAA ожидал вспышки X-класса от всех групп солнечных пятен, что подтверждается на рисунке 61. Методы, основанные на классификации Макинтоша и статистике Пуассона, прогнозировали вспышки M-класса от пятен 12887 с небольшой вероятностью (10%) согласно сайту NOAA. Также с вероятностью 75% ожидалась сильная геомагнитная буря в высоких широтах [16].

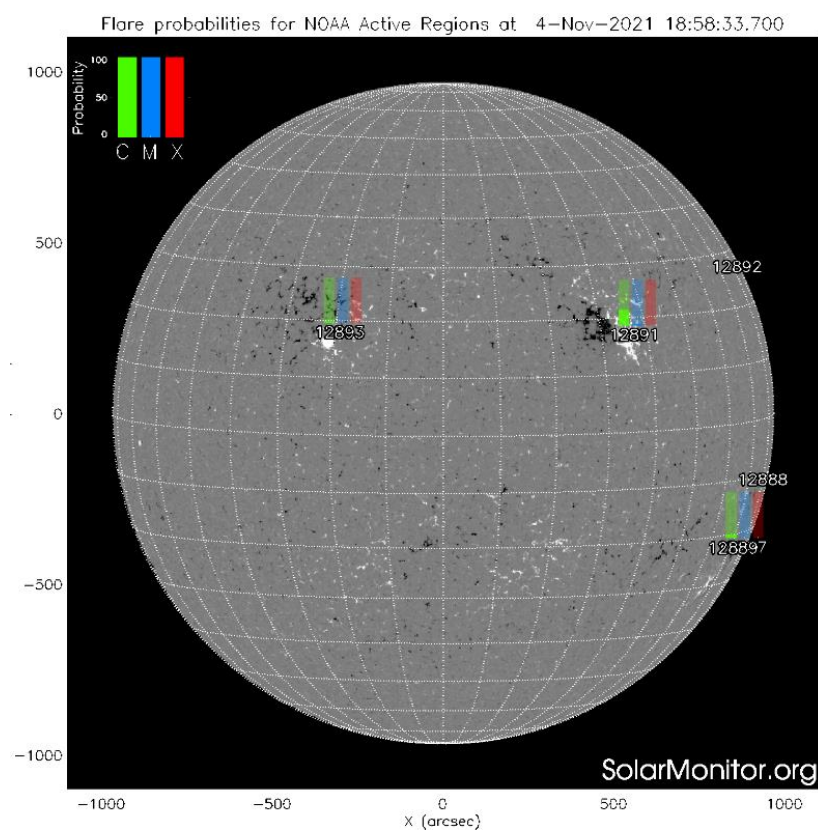


Рисунок 61 – Прогноз солнечных вспышек по системе NOAA

VI. Вероятность геомагнитной активности с 04 - Nov до 06 - Nov

А. Средние широты

| | | | |
|---------------|-----|-----|-----|
| Активно | 35% | 35% | 40% |
| Слабый шторм | 45% | 25% | 20% |
| Большой шторм | 10% | 05% | 05% |

В. Высокие широты

| | | | |
|---------------|-----|-----|-----|
| Активно | 05% | 10% | 10% |
| Слабый шторм | 20% | 20% | 30% |
| Большой шторм | 75% | 55% | 55% |

Рисунок 62 – Вероятность геомагнитной активности
за период 4 – 6 ноября 2021 г.

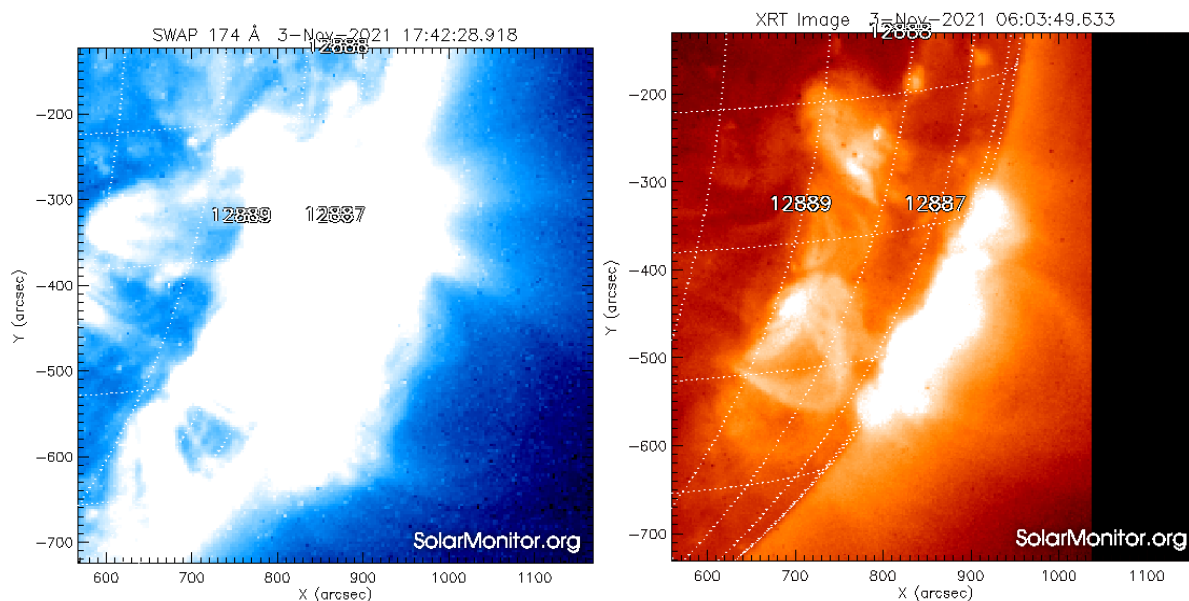


Рисунок 63 – Спутниковые снимки, зафиксировавшие СМЕ из активной области пятен 12889 и 12887

При этом индекс Кр, как упоминалось ранее, достиг значения 7, что соответствовало уровню сильной геомагнитной бури класса G3 [13,21].

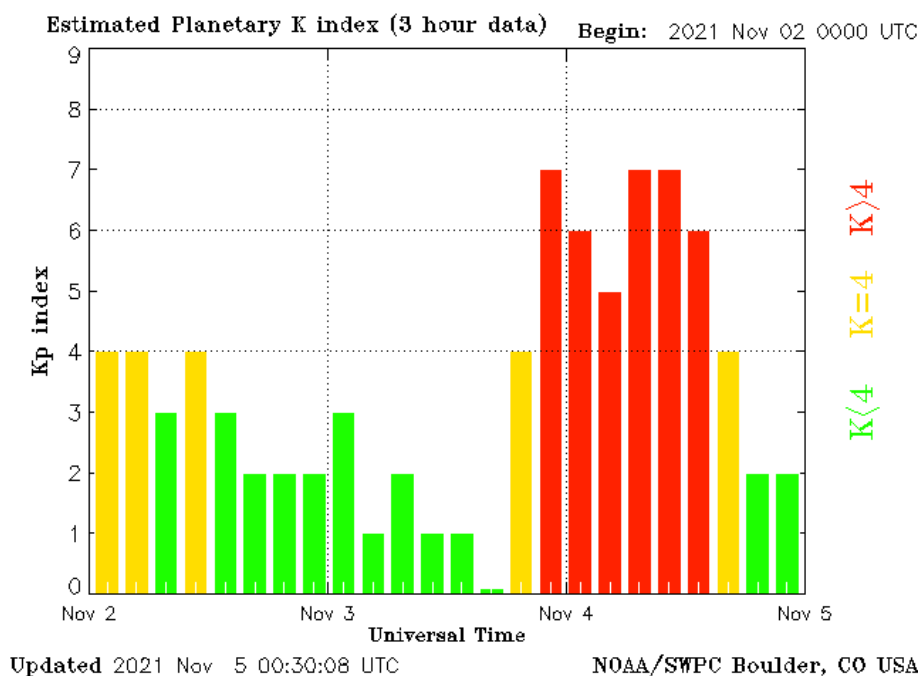


Рисунок 64 – Индекс Кр, опубликованный на сайте NOAA

Стоит отметить, что выброс действительно прогнозировался геофизиками, однако позже по времени, так как ученые не ожидали настолько резкого возрастания плотности плазмы и скорости солнечного ветра — более 800 м/с. На данных, полученных со спутника ACE, видно, как сильно возросла скорость солнечного ветра и его температура, достигнув пиковых значений 832 м/с и около 1 млн К соответственно. Также существенно выросла концентрация протонов — до 36 частиц/см³. В результате над частью Западного и над Восточными полушариям произошло значительное нарушение коротковолновой связи [16].



Рисунок 65 – Данные спутника ACE за период 3 – 9 ноября 2021 г.

Примечательно и то, что из-за коронального выброса и сильного потока солнечного ветра значительно возросло авроральное кольцо, практически до 50°. На рисунке 66 приведен прогноз полярных сияний от NOAA для 4 ноября. Красная область является наиболее возмущенной областью в магнитосфере Земли. Во время спокойного Солнца авроральное кольцо не превышает в ширину 3000 км. Также на рисунке 66 приведен пример увеличения широты

аврорального кольца в зависимости от индекса геомагнитной активности. Очевидно, что северное полярное сияние можно было увидеть в областях выше красной линии [13].

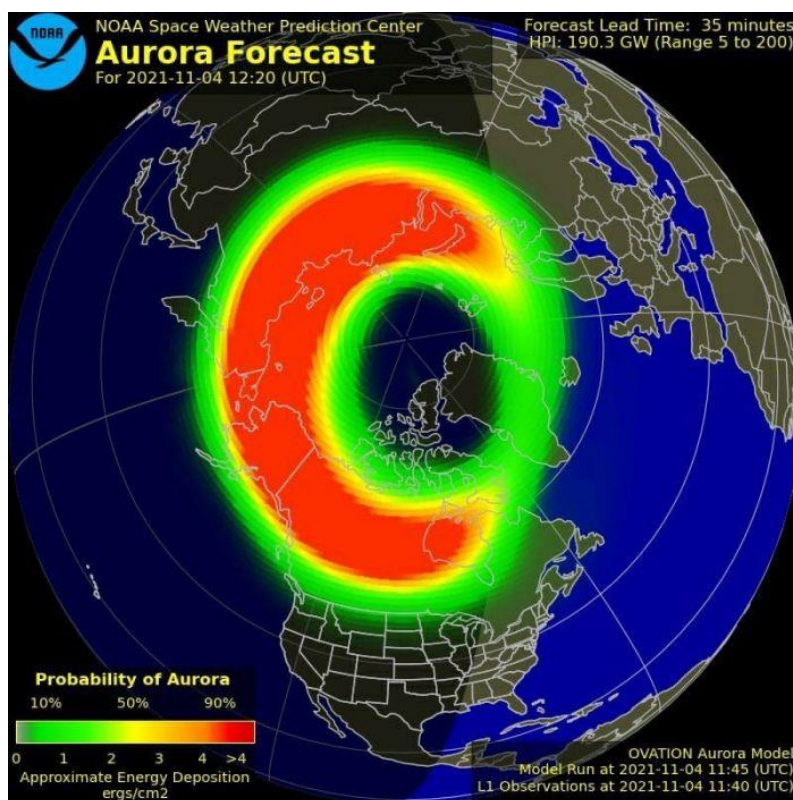


Рисунок 66 – Прогноз полярного сияния за 4 ноября 2021 г.

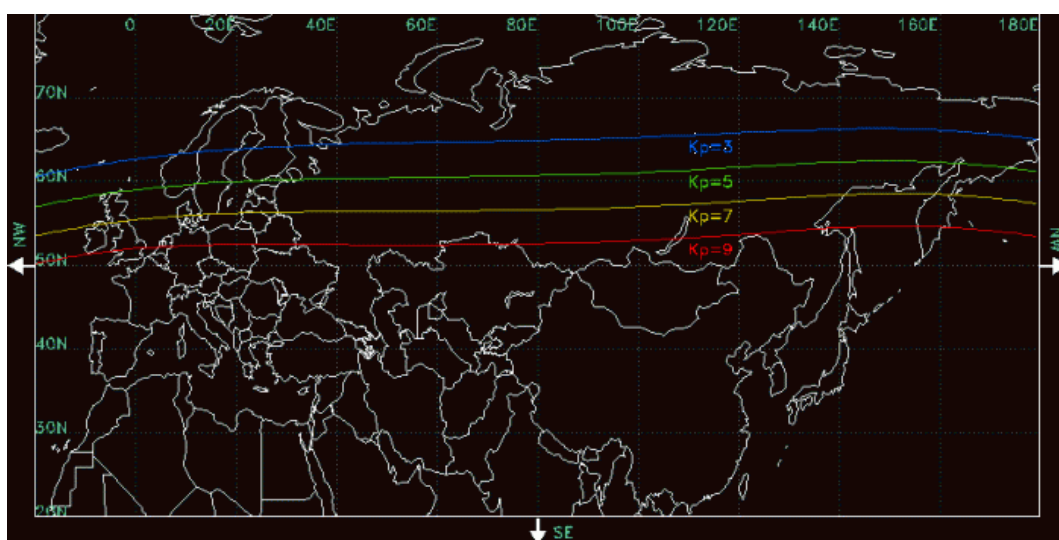


Рисунок 67 – Область полярных сияний в зависимости от индекса K_p

Итак, рассмотрим подробнее полученные консультативные сообщения о космической погоде за 4 и 5 ноября 2021 года. Всего за данный период было получено 7 сообщений. Все они были выпущены глобальным консультативным центром SWPC (США), и все предупреждали об умеренном ухудшении высокочастотной связи. Текст четырех консультативных сообщений приведен на рисунке 68.

| | |
|--|---|
| <p>02:36:12 04-11-2021 Leng=367 Chan=AFTN FNXX02 KWNP 040234 KWNP 040234 SWX ADVISORY DTG: 20211104/0234Z SWXC: SWPC ADVISORY NR: 2021/38 SWX EFFECT: HF COM MOD OBS SWX: 04/0229Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +6 HR: 04/0900Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +12 HR: 04/1500Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +18 HR: 04/2100Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +24 HR: 05/0300Z HNH HSH E180 - W180 RMK: NXT ADVISORY: 20211104/0900Z=</p> | <p>08:31:32 04-11-2021 Leng=416 Chan=AFTN FNXX02 KWNP 040830 KWNP 040830 SWX ADVISORY DTG: 20211104/0830Z SWXC: SWPC ADVISORY NR: 2021/40 SWX EFFECT: HF COM MOD OBS SWX: 04/0829Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +6 HR: 04/1500Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +12 HR: 04/2100Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +18 HR: 05/0300Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +24 HR: 05/0900Z NOT AVBL RMK: MAXIMUM USABLE FREQUENCIES DEPRESSED IN THE AFFECTED AREAS. NXT ADVISORY: 20211104/1500Z=</p> |
| <p>02:48:22 04-11-2021 Leng=468 Chan=AFTN FNXX02 KWNP 040247 KWNP 040247 SWX ADVISORY DTG: 20211104/0247Z SWXC: SWPC ADVISORY NR: 2021/39 NR RPLC: 2021/38 SWX EFFECT: HF COM MOD OBS SWX: 04/0244Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +6 HR: 04/0900Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +12 HR: 04/1500Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +18 HR: 04/2100Z HNH HSH E180 - W180 FCST SWX +24 HR: 05/0300Z HNH HSH E180 - W180 RMK: CORRECTED TO ADD REMARK: MAXIMUM USABLE IN AFFECTED AREAS. NXT ADVISORY: 20211104/0900Z=</p> | <p>15:19:26 04-11-2021 Leng=403 Chan=AFTN FNXX02 KWNP 041518 KWNP 041518 SWX ADVISORY DTG: 20211104/1518Z SWXC: SWPC ADVISORY NR: 2021/41 SWX EFFECT: HF COM MOD OBS SWX: 04/1500Z HNH W180 - E180 FCST SWX +6 HR: 04/2100Z HNH W180 - E180 FCST SWX +12 HR: 05/0300Z HNH W180 - E180 FCST SWX +18 HR: 05/0900Z HNH W180 - E180 FCST SWX +24 HR: 05/1500Z HNH W180 - E180 RMK: MAXIMUM USABLE FREQUENCY DEPRESSED IN AFFECTED REGIONS. NXT ADVISORY: 20211104/2200Z=</p> |

Рисунок 68 – Консультативные сообщения за 4 ноября 2021 г.

Заметим, что консультативные сообщения не выпускались каждые шесть часов, как прописано в материалах ИКАО, а чаще, чтобы скорректировать прогноз на зону влияния и добавить ремарки для лучшего понимания пользователей происходящего процесса. Рассмотрим, на какие зоны оказывалось влияние.

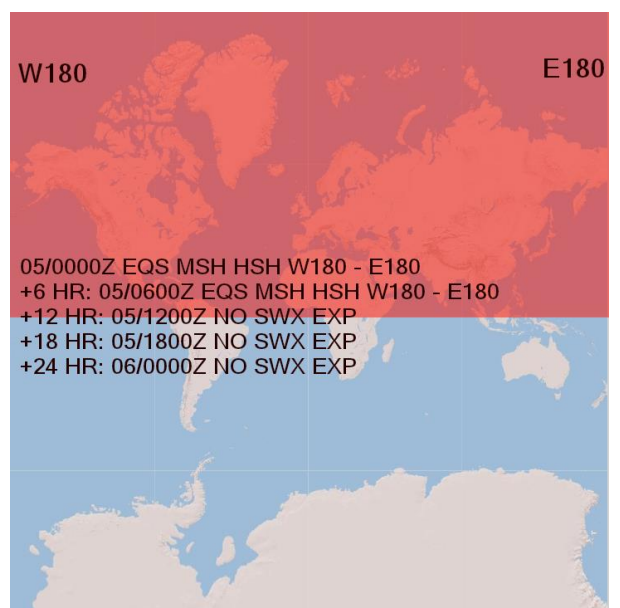
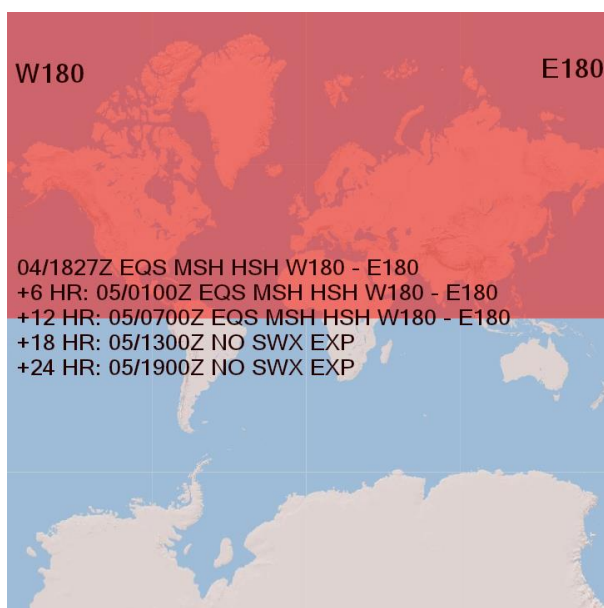
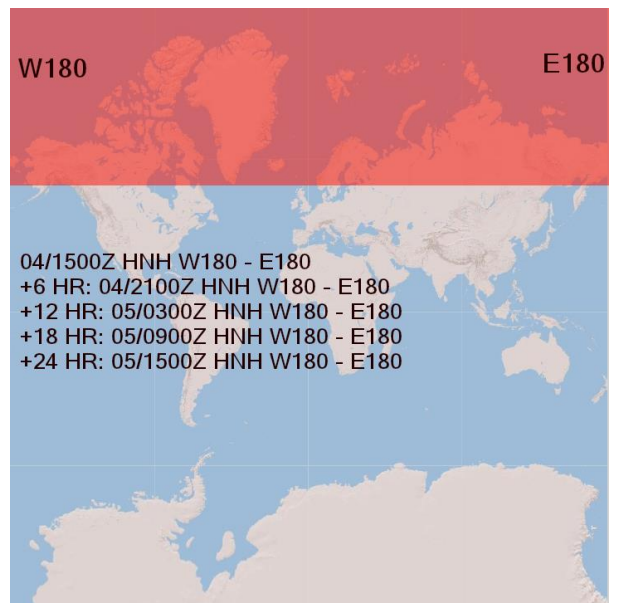




Рисунок 69 – Распространение ОГЯ с 4 по 5 ноября 2021 г.

Как следует из консультативных сообщений, в первых трех неблагоприятное явление ожидалось только в полярных областях, причем до 03 UTC 5 ноября 2021 года. Затем зона ухудшения высокочастотной связи сместилась только на северный полюс, а в дальнейшем и на все северное полушарие, вплоть до экваториальных широт. В строке RMK указывалось, что значительное ухудшение высокочастотной связи ожидается исключительно в выделенных областях.

Как известно, высокочастотная связь ухудшается за счёт влияния солнечной активности на ионосферу — в нашем случае это был мощный корональный выброс масс и последовавший за ним быстрый солнечный ветер. Чаще всего влияние на ионосферу особенно ощущается на высокие широты, что подтверждается зонами, описанными в SWX. Также имеет место такое явление, как поглощение полярных шапок. Напомним, что коротковолновая связь является основным источником связи для широт и особенно важна во время трансокеанических перелетов.

Согласно информации, полученной по модели GAMBIT (Глобальной ассимиляционной модели изменения нижнего уровня ионосферы), созданной

на основе IRI, отчетливо видно, что MUF (максимально применимая частота) снизилась примерно на 50% во время геомагнитной бури. Цветные точки обозначают локальные отклонения MUF от международной модели эталонной ионосферы в спокойное время (IRI). Также цветные точки являются пунктами, где выпускают зонды от GIRO (Глобальной ионосферной радиообсерватории университета Массачусетс). Пунктирная линия обозначает магнитный экватор, заштрихованная область — ночное время. Отметим, что данная модель подтверждает целесообразность выпуска консультативных сообщений по всему северному полушарию [13, 15].

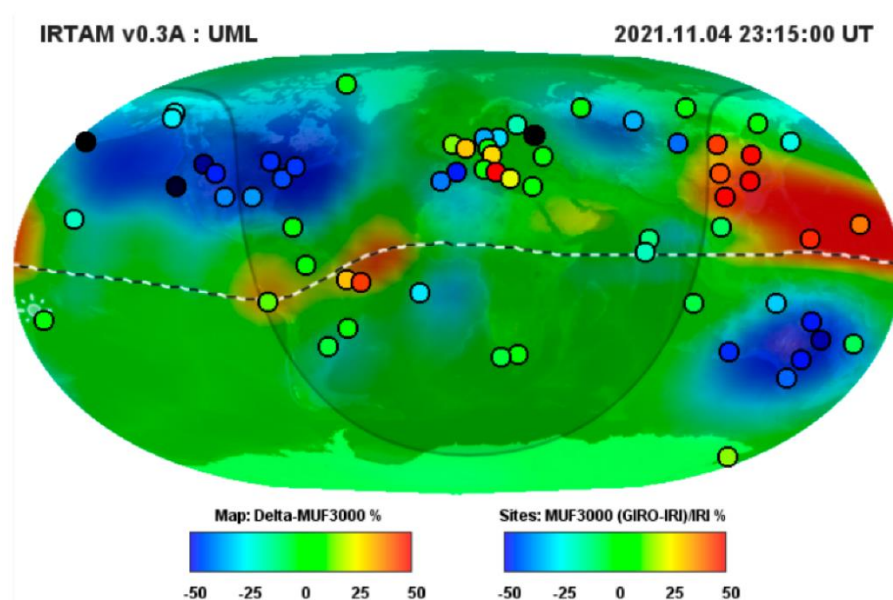


Рисунок 70 – Модель ионосферы от GIRO за 04.11.2021 г.

На рисунке ниже представлена глобальная карта TEC (общее содержание электронов), созданная с помощью значений системы GNSS в 12 266 точках проникновения и на основе данных 4911 приемников. Серым цветом обозначены области, не обеспеченные покрытием датчиков. Красным обозначены области с повышенным содержанием электронов. В зоне магнитного экватора над Центральной Америкой концентрация однозначно превышена, что можно объяснить ионосферной аномалией в данном месте [13, 15].

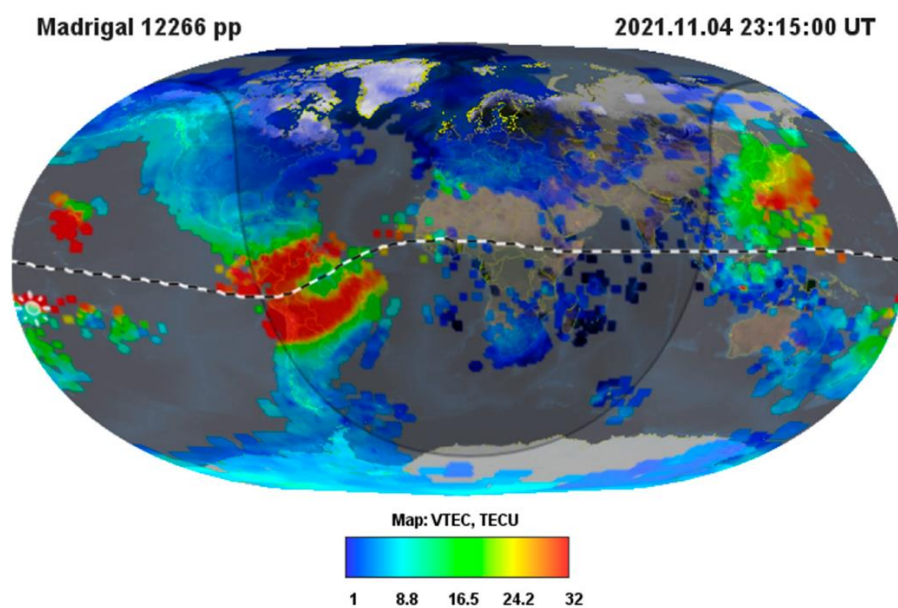


Рисунок 71 – Глобальная вертикальная карта ТЕС за 04.11.2021 г.

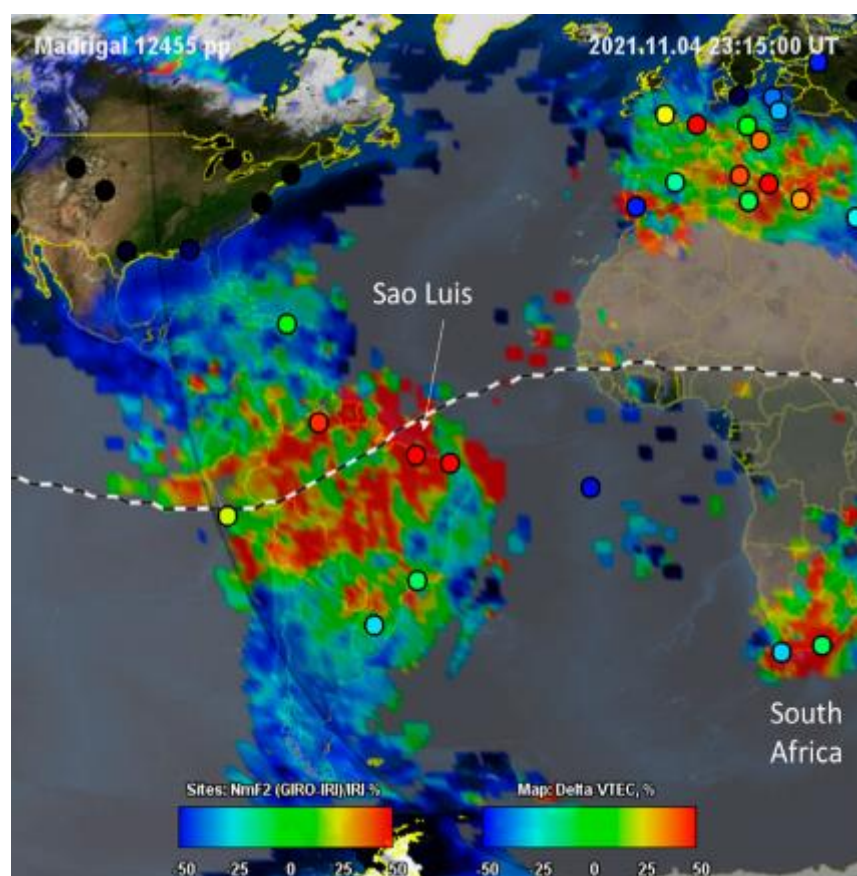


Рисунок 72 – Аномалия, связанная с зоной Центральной Америки

Следовательно, можно сделать вывод о том, что консультативное сообщение о космической погоде было выпущено обосновано, на верно заданные координаты ухудшения высокочастотной связи.

3.3 Исследование влияния космической погоды на спутниковое позиционирование на основе консультативных сообщений за 11-12 октября 2021 г.

Спутниковая связь также сильно зависит от ионосферных бурь. Ионосферные возмущения влекут за собой изменения амплитуды и фазы сигнала, которые более знакомы по термину «ионосферные мерцания» или сцинтилляции, причем амплитудные мерцания характерны размерами до сотен метров, тогда как фазовые — от сотен метров до нескольких километров. Как упоминалось ранее, сильные мерцания способны привести к полной потере сигнала или снижению его качества. В качестве меры для оценки уровня колебаний используются амплитудные индексы (S_4) и фазовые индексы (σ_f). Исследуем влияние ионосферных бурь на спутниковые сигналы во время возмущений космической погоды [1].

Крупнейшим солнечным событием, произошедшим в октябре 2021 года, стала солнечная вспышка класса M1.6, наблюдавшаяся 9 октября 2021 года. Согласно прогнозу, ее влияние должно было быть оказано на Землю 10-12 октября. Центр прогнозирования NOAA обращал повышенное внимание на активную область солнечного пятна 12882, и ожидал вспышку вплоть до X-класса. В данном случае вспышку X-класса подтверждали и методы, основанные на классификации Макинтоша. Также все расчетные методы прогнозировали вспышки M-класса. Сильная геомагнитная буря ожидалась 11-12 октября в высоких широтах, что в дальнейшем было подтверждено [13, 15].

| NOAA Number | McIntosh Class | C-class | | | M-class | | | X-class | | |
|-------------|----------------|---------|--------|------|---------|--------|------|---------|--------|------|
| | | MCEVOL | MCSTAT | NOAA | MCEVOL | MCSTAT | NOAA | MCEVOL | MCSTAT | NOAA |
| 12882 | Dso/Dso | 21 | 30 | 50 | 1 | 7 | 10 | 0 | 1 | 1 |

Рисунок 73 – Текстовый прогноз вспышек по системе NOAA

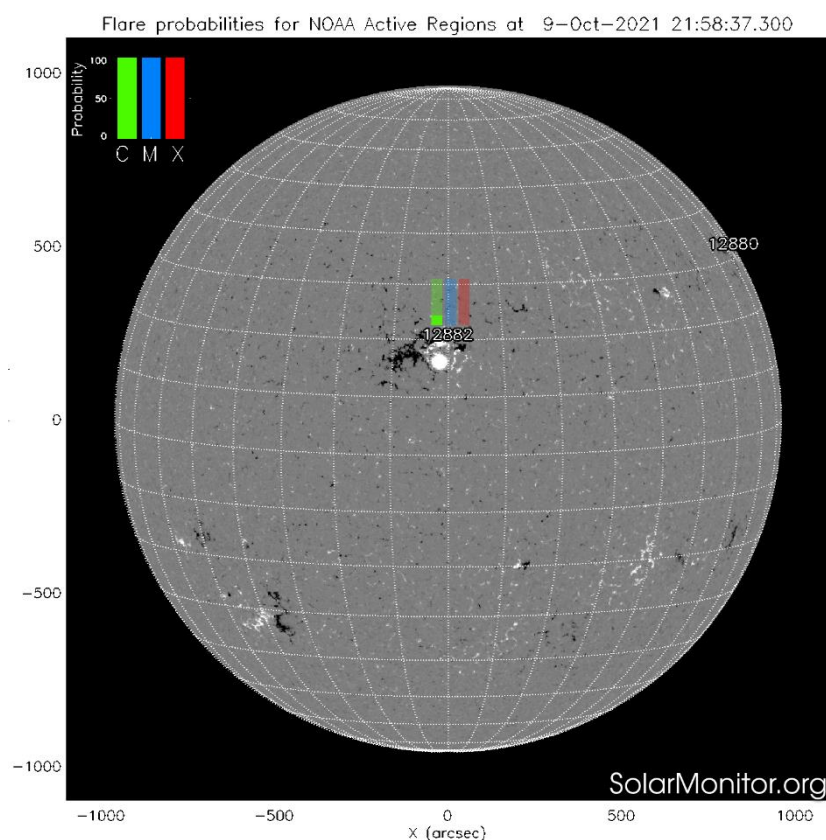


Рисунок 74 – Графический прогноз солнечных вспышек по системе NOAA

В. Высокие широты

| | | | |
|---------------|-----|-----|-----|
| Активно | 15% | 05% | 10% |
| Слабый шторм | 25% | 20% | 25% |
| Большой шторм | 20% | 70% | 60% |

Рисунок 75 – Вероятность геомагнитной активности
за период 10 – 12 октября 2021 г.

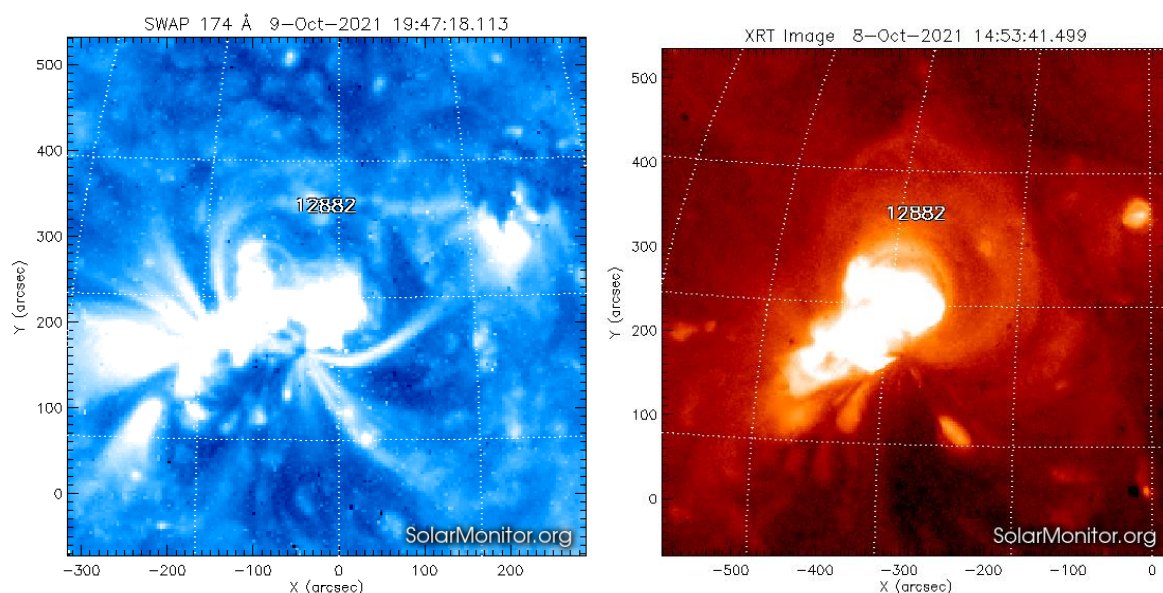


Рисунок 76 – Спутниковые снимки, зафиксировавшие СМЕ из активной области пятна 12882

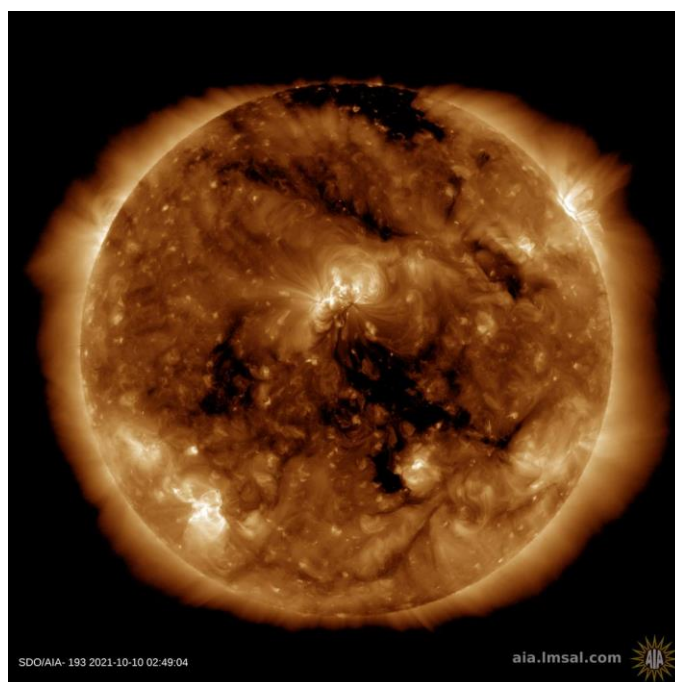


Рисунок 77 – Корональная дыра, снимок SDO за 10 октября 2021 г.

Отметим, что индекс Кр достиг значения 6, что соответствует уровню сильной магнитной бури, и держался высоким 12 октября 2021 года в течении суток. Следовательно, магнитное поле Земли однозначно было возмущено [13, 21].

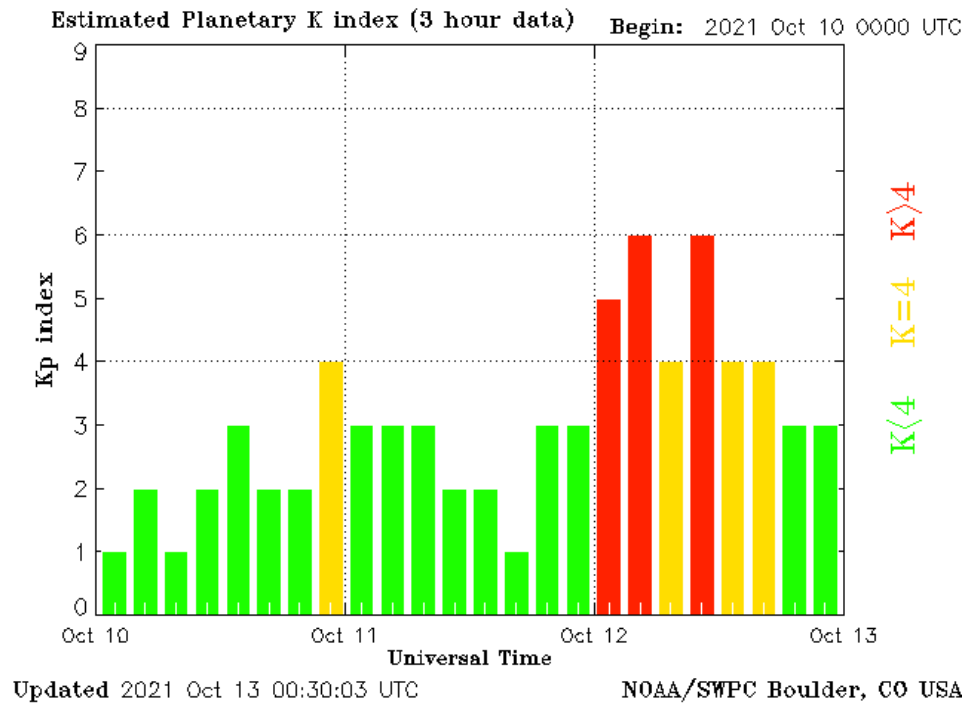


Рисунок 78 – Индекс К_р, опубликованный на сайте NOAA

На графике данных, полученных с ACE, отчетливо видно повышение скорости и температуры солнечного ветра, связанное с корональным выбросом масс и ускорением потока плазмы из-за корональной дыры. Максимальная скорость солнечного ветра наблюдалась в пределах 450-500 км/с, концентрация протонов 12 октября составила 39 частиц/см³.

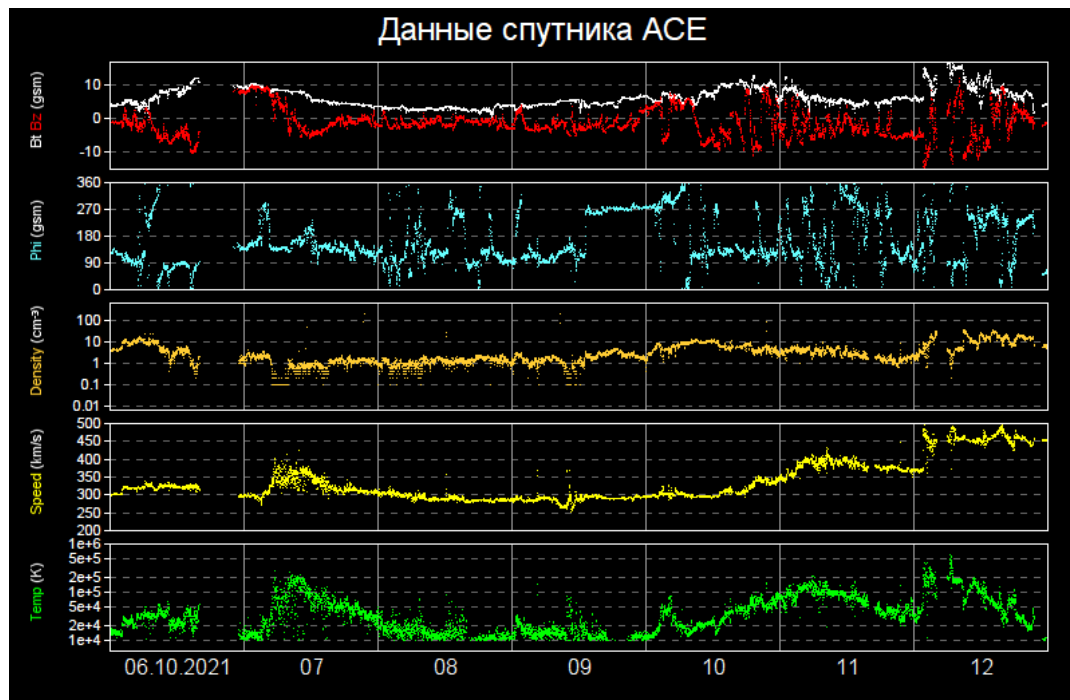


Рисунок 79 – Данные спутника ACE за период 6 – 12 октября 2021 г.

Согласно данным об индексе АЕ, являющимся суммой индексов АU и АL, интенсивность возмущения магнитного поля резко возросла на период 11-12 октября 2021 года. Индекс АЕ достиг своего максимума в 11 UTC 12 октября (2600 нТл) [20].

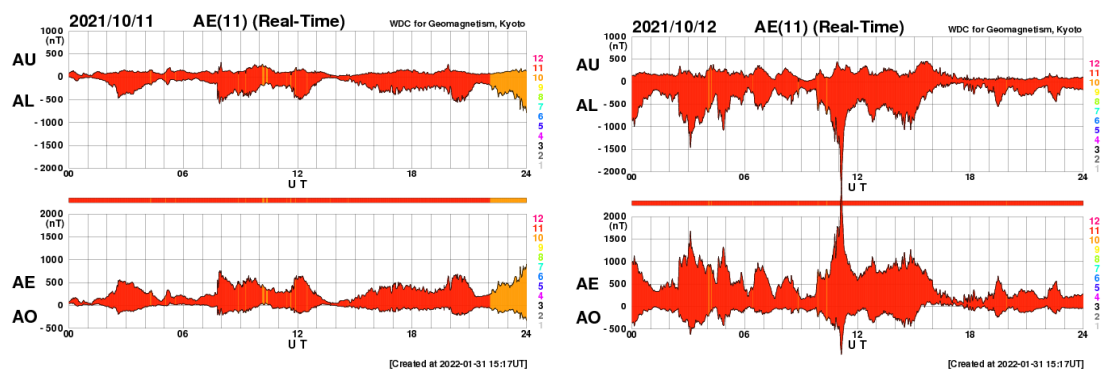


Рисунок 80 – Индекс АЕ, взятый с сайта Мирового центра данных геомагнетической обсерватории Киото

Рассмотрим подробнее консультативные сообщения, полученные за период 11-12 октября 2021 года. Было получено 6 сообщений об умеренном

ухудшении спутниковой связи. Они были выпущены консорциумом ACFJ при дежурстве Австралии. Текст одного из сообщения приведен ниже. Было замечено, что зачастую для корректировки координат ионосферного возмущения консорциум ACFJ сперва отменяет действующее сообщение, затем выпускает новое. Также в строке RMK дается краткая информация о том, что ионосферная буря продолжается и ее влияние на спутниковую связь может повлечь за собой ухудшение и/или потерю сигнала. При отмене ремарка оповещает о том, что ионосферные сцинтилляции затухают и в дальнейшем не будут оказывать влияние на спутниковое позиционирование.

```
21:11:43 11-10-2021 Leng=693 Chan=AFTN
FNXX02 YMMC 112110
YMMC 112110
SWX ADVISORY
DTG:                20211011/2110Z
SWXC:               ACFJ
ADVISORY NR:        2021/28
SWX EFFECT:         GNSS MOD
OBS SWX:            11/2052Z HNH MNH E000 - E090
FCST SWX +6 HR:     12/0300Z NO SWX EXP
FCST SWX +12 HR:    12/0900Z NO SWX EXP
FCST SWX +18 HR:    12/1500Z NO SWX EXP
FCST SWX +24 HR:    12/2100Z NO SWX EXP
RMK:                SPACE WEATHER EVENT (IONOSPHERIC DISTURBANCE) IN PROGRESS.
                   IMPACT ON GNSS PERFORMANCE POSSIBLY LEADING TO LOSS OF
                   GNSS SIGNALS AND/OR DEGRADATION OF TIMING
                   AND POSITIONING PERFORMANCE.
NXT ADVISORY:       WILL BE ISSUED BY 20211012/0300Z=
```

Рисунок 81 – Консультативные сообщения за 11-12 октября 2021 г.

Рассмотрим зоны влияния, указанные в полученных консультативных сообщениях, и проследим за эволюцией ионосферного шторма. Возмущения ионосферы ожидалось исключительно в северном полушарии и на протяжении двух суток затрагивали и средние, и высокие широты, а также оба полушария. Возможно, «перемещение» ионосферной бури связано с суточным ходом Солнца и влиянием излучения на различные слои ионосферы.

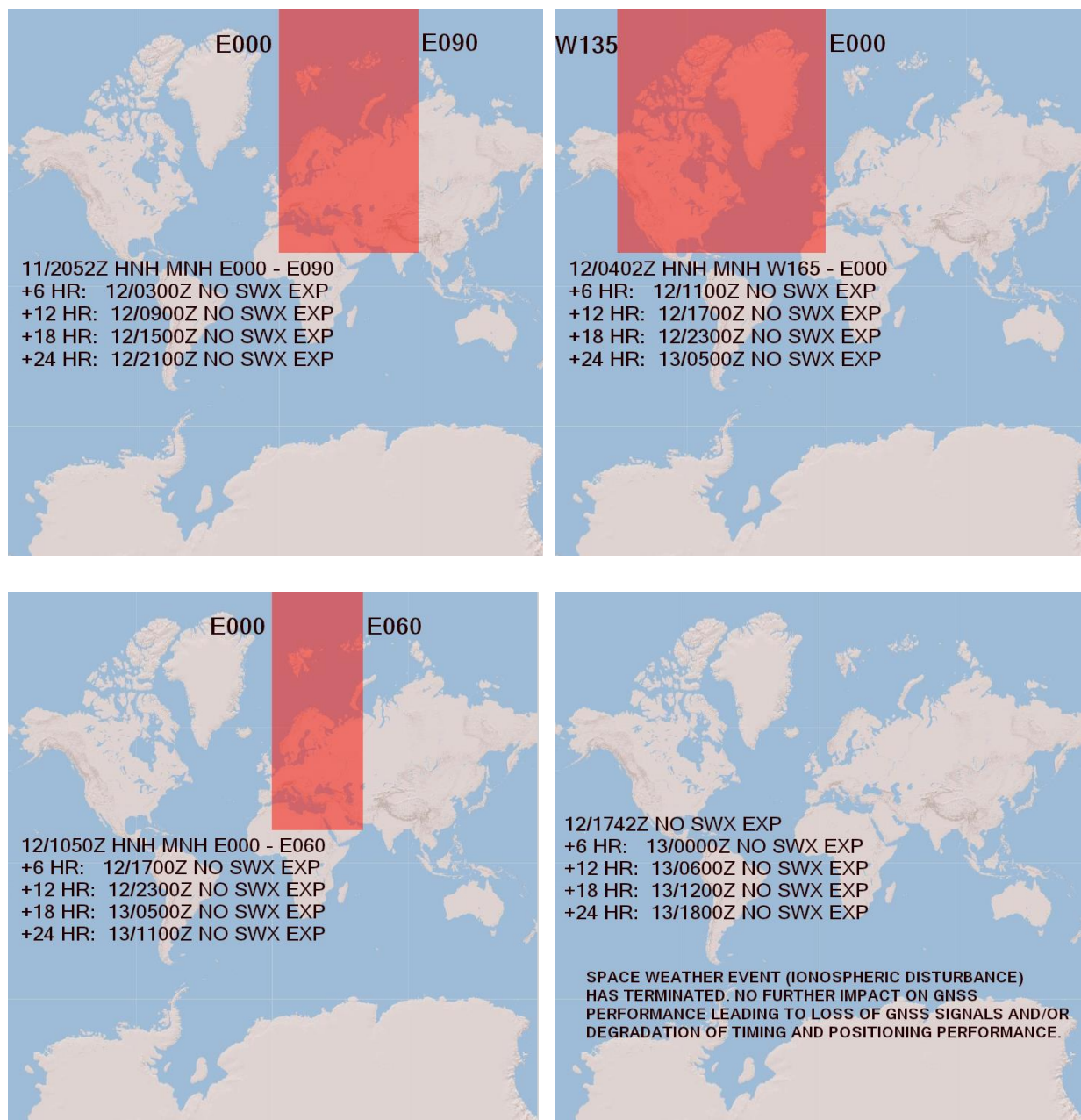


Рисунок 82 – Распространение ОГЯ с 11 по 12 октября 2021 г.

Прежде чем подробно рассматривать влияние солнечной активности на спутниковую навигацию, уточним, в каких частотах проводится спутниковое позиционирование. Длины волн, частоты и их функции приведены в таблице [6].

Таблица 6 – Функции различных длин волн

| Диапазон | Частоты | Функции |
|------------------------------------|------------------|---|
| УНЧ – ультранизкие | < 3 кГц | навигация, определение точного времени и частоты |
| ОНЧ – очень низкие | $3 - 30$ кГц | |
| НЧ (ДВ) – низкие длинноволновые | $30 - 300$ кГц | радиовещание, навигация |
| СВ – средние | $300 - 3000$ кГц | радиовещание |
| КВ – коротковолновые | $3 - 30$ МГц | радиосвязь, определение точного времени, радиолокация |
| УКВ – ультракоротковолновые | $30 - 300$ МГц | телевидение, радиовещание, авиационная радиосвязь |
| СВЧ – сверхвысокие | $300 - 3000$ МГц | радиолокация, навигация, радиолокация, навигация, спутниковая связь и навигация |
| ОВЧ – очень высокие | $3 - 30$ ГГц | |
| УВЧ – ультравысокие | $30 - 300$ ГГц | |

Для исследования влияния на спутниковую связь были взяты данные о фазовых и амплитудных сцинтилляциях, взятые с приемника Septentrio PolaRx5, установленного в Апатитах, для двух глобальных навигационных систем — российской ГЛОНАСС и американской GPS. Также на графиках представлены горизонтальные и вертикальные компоненты геомагнитного бури, с помощью которых можно дать оценку мощности геомагнитного шторма, и амплитуда ультранизких частот также в горизонтальных и вертикальных компонентах [1, 6].

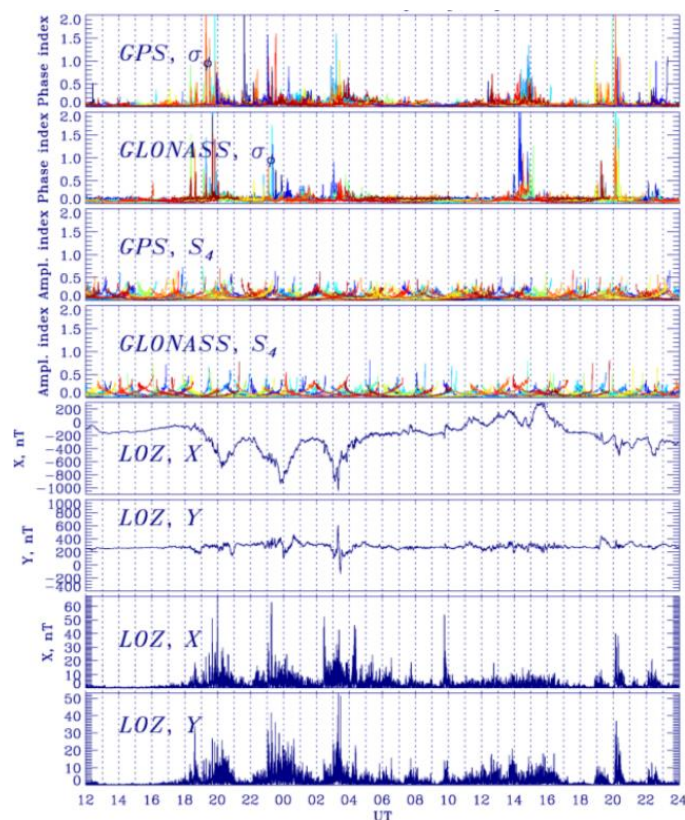


Рисунок 83 – Фазовые и амплитудные сцинтилляции за 11-12 октября 2021 г.

На графике видно, что максимум амплитуды мощности геомагнитной бури составил 800 нТл в горизонтальной компоненте. Вертикальная компонента значительно повысилась только в промежуток между 02 и 05 UTC 12 октября. Отметим, что геомагнитная буря вызвала сильные сцинтилляции как для российских спутников, так и для американских, причем максимум фазовой сцинтилляции составил до 2 рад. Также стоит заметить, что σ_ϕ превысил критические значения и в дневное время, и в ночное, хотя колебания в промежуток времени между 04 и 12 UTC не превышали 0,5 рад. Предположительно увеличение фазовой амплитуды в вечерние часы 12 октября обусловлено значительными колебаниями горизонтальной компонентой геомагнитной бури, причем реакция спутниковой связи на отрицательные показатели больше, чем при положительной, о чем свидетельствует участок на графике с 19 UTC 11 октября по 04 UTC 12 октября, относительно промежутка 13 –16 UTC. Можно сделать вывод о том,

что у фазовых сцинтилляций отсутствует прямая корреляция с амплитудой возмущения геомагнитной бури. С ростом амплитуды геомагнитных пульсаций увеличиваются значения σ_F [1].

Некоторые всплески в горизонтальной и вертикальной компонентах ультранизких частот не соответствуют изменению фазовых и амплитудных колебаний сигналов GNSS и не коррелируются с геомагнитными возмущениями. Следовательно, изменения горизонтальных и вертикальных компонент ультранизких частот вызвали другие механизмы, такие как случайные высыпания авроральных частиц. Однако отметим, что наиболее сильные сцинтилляции имеют прямую корреляцию по времени своего возникновения с ростом амплитуды ультранизких волн.

Для того, чтобы уменьшить влияние солнечной активности на международные спутниковые системы, необходимо не только совершенствовать технический процесс, но и проводить непрерывный мониторинг космической погоды и оперативно выдавать предупреждения авиакомпаниям и экипажам.

3.4. Исследование влияния космической погоды на радиационную обстановку на основе сообщений о космической погоде за сентябрь 2020 – январь 2023 гг.

Корональный выброс масс, произошедший 10 октября 2021 года, интересен в том числе и повышенным уровнем радиоактивных частиц в атмосфере. 12 октября потоки протонов незначительно превышали уровень фоновых значений (по данным КА "Электро-Л") [14].

| МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ протон·см ⁻² ·сек ⁻¹ ·стер ⁻¹ (КА "МЕТЕОР") НА ТРАССАХ ПКА | | | | | | | |
|--|---------------|----------------------|------------------|-------------------|-----|-----|---------------|
| ДАТА | ВРЕМЯ E>15MeV | ВРЕМЯ E>25MeV | ВРЕМЯ E:20-45MeV | ВРЕМЯ E:10-160MeV | | | |
| | UTC | PFU | UTC | PFU | UTC | PFU | UTC |
| 06.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 07.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 08.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 09.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 10.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 11.10.2021 | | ПРЕВЫШЕНИЕ НАД ФОНОМ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 12.10.2021 | | ПРЕВЫШЕНИЕ НАД ФОНОМ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |

| МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ протон·см ⁻² ·сек ⁻¹ ·стер ⁻¹ (КА "ЭЛЕКТРО-Л" №2) НА ТРАССАХ ПКА | | | | | |
|--|-----------------|----------------------|-------------------|-----|---------------|
| ДАТА | ВРЕМЯ E:9-20MeV | ВРЕМЯ E:20-40MeV | ВРЕМЯ E:40-110MeV | | |
| | UTC | PFU | UTC | PFU | |
| 06.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 07.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 08.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 09.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 10.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 11.10.2021 | | ПРЕВЫШЕНИЕ НАД ФОНОМ | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 12.10.2021 | | ПРЕВЫШЕНИЕ НАД ФОНОМ | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |

| МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ протон·см ⁻² ·сек ⁻¹ ·стер ⁻¹ (КА "GOES") НА ТРАССАХ ПКА | | | | | | | |
|--|---------------|---------------|---------------|----------------|-----|-----|---------------|
| ДАТА | ВРЕМЯ E>10MeV | ВРЕМЯ E>30MeV | ВРЕМЯ E>50MeV | ВРЕМЯ E>100MeV | | | |
| | UTC | PFU | UTC | PFU | UTC | PFU | UTC |
| 06.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 07.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 08.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 09.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 10.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 11.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |
| 12.10.2021 | | ФОН ГКЛ | | | | | НЕВОЗМУЩЕННАЯ |

Рисунок 84 – Радиационный фон ГКЛ за 11-12 октября 2021 г

Повышенная радиационная опасность подтверждается и спутниковыми снимками с коронографа LASCO, установленного на SOHO. На изображении отчетливо видны высокоэнергичные частицы, распространяющиеся вместе с солнечным ветром в космическое пространство [15].

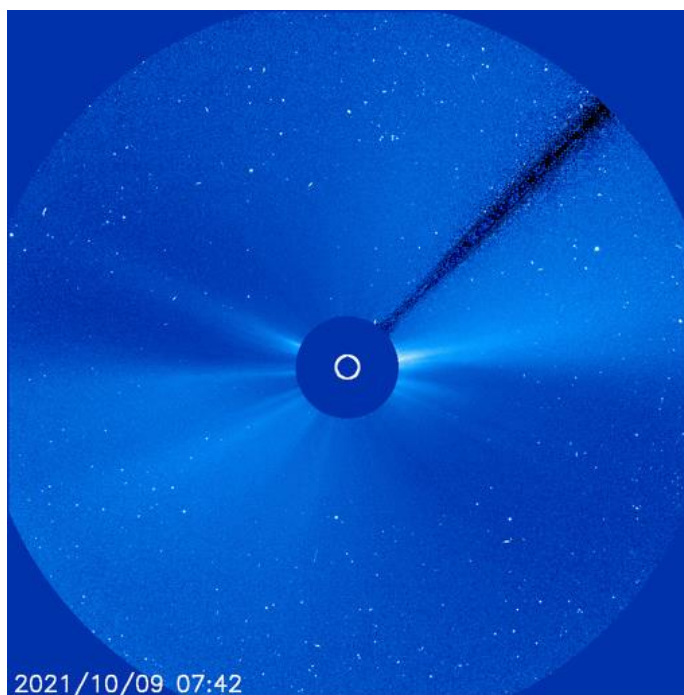


Рисунок 85 – Снимок с коронографа LASCO

Часть данных для исследования влияния космической погоды на повышенный радиационный фон в атмосфере Земли были взяты с сайта <https://spaceweather.com/archive.php>. Например, данные аэростата космической погоды, запускаемого студентами Калифорнийского университета. Аэростат оснащен специальным датчиком, который предназначен для обнаруживания вторичных частиц и диагностики формы излучения из космоса (ГКЛ, СКЛ или влияние сильного солнечного ветра), который обнаруживает рентгеновские и гамма-лучи в диапазоне энергий от 10 кэВ до 20 МэВ. Аэростат вел измерения с марта 2015 года по июнь 2021 года. Рисунок 87 показывает данные с датчика и наглядно иллюстрирует тенденцию к уменьшению космической радиации. Максимум дозы ГКЛ и СКЛ приходился на конец 2019 года и с тех пор уровень радиации уменьшается, так как во время солнечного минимума магнитное поле Солнца ослабевает и пропускает больше ГКЛ в Солнечную систему. В разделе 3.1 подтверждалось то, что солнечная активность в будущем будет только расти, а значит, космическая радиация будет снижаться [11].

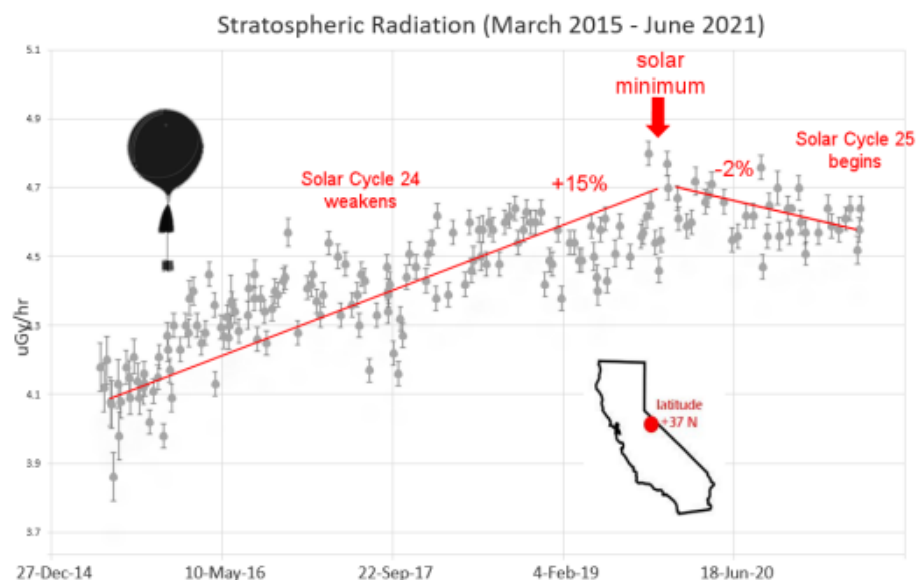


Рисунок 86 – Радиация в стратосфере за период март 2015 – июнь 2021 гг.

Очевидно, что аэростат проходит те высоты, на которых обычно совершаются полеты воздушных судов. На рисунке 88 мощности доз рассчитываются как кратные уровню моря, то есть при полете самолета на высоте около 8 км доза радиации будет в 10 раз превышать уровень радиации на уровне моря, тогда как на высоте 12 км уровень радиации будет уже в 50 раз больше. Очевидно, что чем дольше длится полет, тем больше уровень полученной радиации [11].

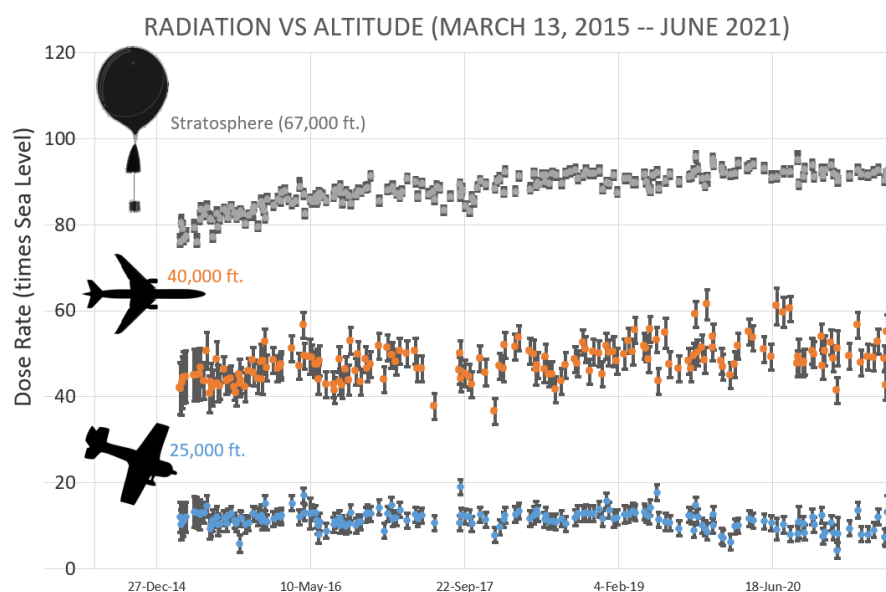


Рисунок 87 – График мощности доз в зависимости от высоты

На сайте ИПГ им. Фёдорова есть специальная модель для расчета радиации, полученной во время полета в зависимости от его длительности, высоты, скорости, региона и солнечной активности. В качестве входных параметров модель использует пятиминутные потоки частиц, полученные с космического аппарата GOES, фазу цикла солнечной активности, трехчасовые значения K и спектр ГКЛ. Солнечная активность в этой модели описывается (для среднего цикла) единственным параметром K, который изменяется от значения 0.3 в минимуме активности до значения 2,5 в максимуме [14].

Для сравнения важно учитывать, чтобы полеты длились примерно одинаковое время. Исследуем три маршрута продолжительностью около 6,5 часов и расстоянием около 5800 км.

Первый маршрут Анкоридж-Мурманск будет проходить по высоким широтам и считается трансполярным. Рассмотрим, как влияет интенсивность солнечной радиации и высота полета при средней скорости самолета 900 км/ч на возможное облучение экипажа в микрозивертах. Полученные данные представлены в таблице 7.

Очевидно, что с высотой доза радиации возрастает, однако стоит обратить внимание, как сильно меняется данный показатель при максимально активности солнца — более чем в четыре раза! Начиная с высоты 12 км при солнечных бурях такая доза радиации будет превышать годовую, полученную человек при проживании в кирпичном доме. Совершив 8 перелетов по маршруту Анкоридж-Мурманск, экипаж получит годовую предельную дозу радиации и получит серьезную угрозу для своего здоровья.

Согласно приказу Минтранса РФ от 17.07.2008 г. об утверждении Федеральных авиационных правил, при полетах в полярных широтах воздушным судам не рекомендуется подниматься выше шести-восьми километров из-за особенностей структуры магнитного поля и силовых линий в полярных шапках.

Таблица 7 – Зависимость радиационной дозы от высоты полета и солнечной активности для рейса Анкоридж – Мурманск

| Солнечная активность \ Высота, км | 8 | 10 | 12 | 14 |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 0,3 | 26.47 μSv | 53.65 μSv | 88.7 μSv | 120.22 μSv |
| 0,7 | 24.59 μSv | 49.04 μSv | 77.14 μSv | 118.81 μSv |
| 1,5 | 22.37 μSv | 42.68 μSv | 65 μSv | 117.33 μSv |
| 2,5 | 19.54 μSv | 35.95 μSv | 53.27 μSv | 116.76 μSv |

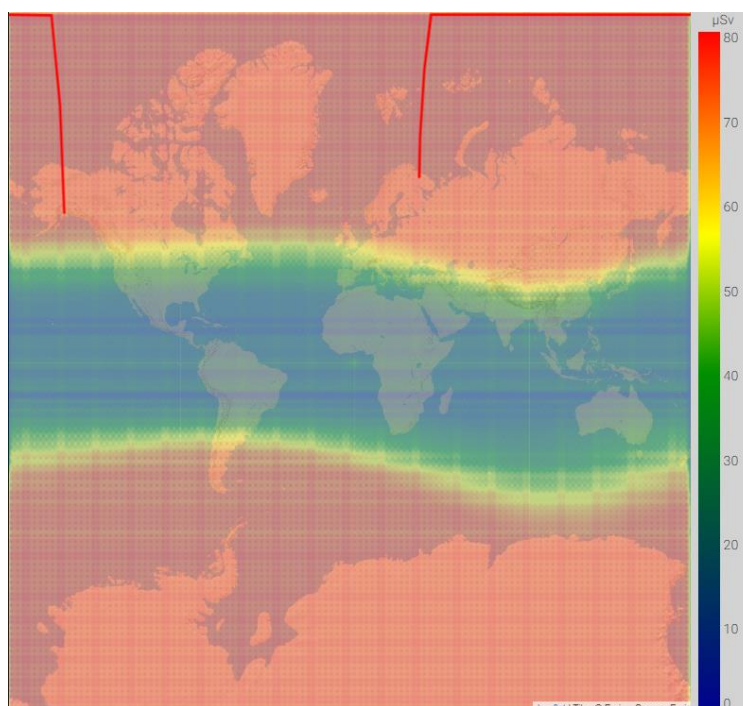


Рисунок 88 – Траектория маршрута Анкоридж-Мурманск и радиационная опасность в соответствии с максимальной солнечной активностью

Второй рассматриваемый нами маршрут — Казань-Хабаровск. Как и в предыдущем случае, виден характерный рост полученной дозы радиации с высотой, однако в случае средних широт воздушные суда не имеют рекомендованных ограничений в виде потолка полета, поэтому такие полеты совершаются и на высотах 14 км. Примечательно и то, что на 14 км доза радиации незначительно варьируется при различных уровнях солнечной активности и остается очень высокой.

Таблица 8 – Зависимость радиационной дозы от высоты полета и солнечной активности для рейса Казань-Хабаровск

| Солнечная активность \ Высота, км | 8 | 10 | 12 | 14 |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 0,3 | 24.3 μSv | 49.72 μSv | 81.74 μSv | 115.27 μSv |
| 0,7 | 22.74 μSv | 45.8 μSv | 72.84 μSv | 114.21 μSv |
| 1,5 | 20.67 μSv | 40.13 μSv | 61.88 μSv | 110.11 μSv |
| 2,5 | 18.04 μSv | 33.91 μSv | 50.95 μSv | 106.01 μSv |

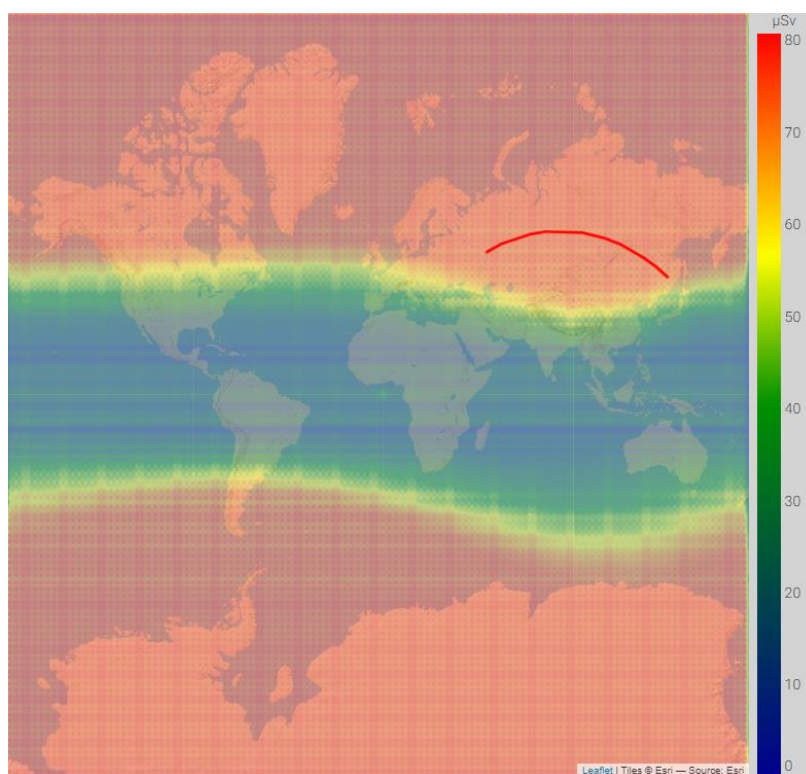


Рисунок 89 – Траектория маршрута Казань-Хабаровск и радиационная опасность в соответствии с максимальной солнечной активностью

Третий маршрут — Дубай-Гуанджоу — проходит в экваториальных широтах. Показательно, что полученные дозы радиации крайне малы, особенно по сравнению с двумя предыдущими таблицами. Можно считать, что чем южнее проходит полет самолета, тем он безопаснее, однако не стоит забывать про ионосферные экваториальные аномалии, которые могут значительно усилиться при влиянии на ионы ГКЛ и СКЛ.

Таблица 9 – Зависимость радиационной дозы от высоты полета и солнечной активности для рейса Дубай-Гуанджоу

| Высота, км Солнечная активность | 8 | 10 | 12 | 14 |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 0,3 | 11.34 μSv | 18.07 μSv | 26.71 μSv | 35.67 μSv |
| 0,7 | 11.06 μSv | 17.51 μSv | 26.01 μSv | 35.28 μSv |

| | | | | |
|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1,5 | 10.55 μSv | 16.75 μSv | 24.7 μSv | 34.53 μSv |
| 2,5 | 9.95 μSv | 15.76 μSv | 23.19 μSv | 33.68 μSv |

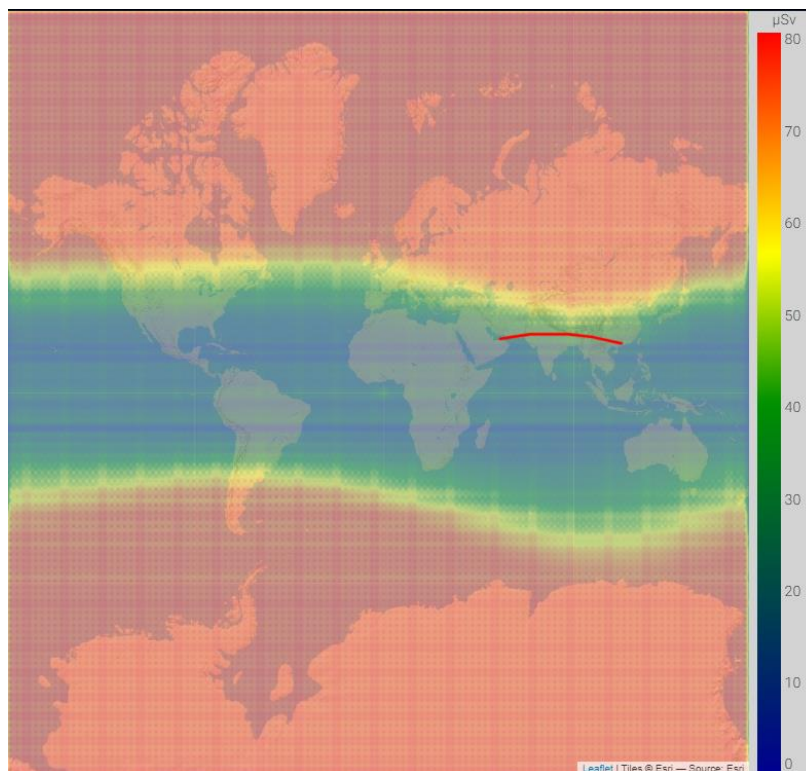


Рисунок 90 – Траектория маршрута Дубай-Гуанчжоу и радиационная опасность в соответствии с максимальной солнечной активностью

На основе табличных данных также были построены графики, наглядно показывающие зависимость уровня радиации от высоты полета и широты при максимальной солнечной активности (график 9) и зависимость уровня радиации от высоты полета и солнечной активности при совершении полета в средних широтах, так как полеты в России наиболее часто совершаются именно в средних широтах (график 10). Графики подтверждают выводы, сделанные при анализе данных с таблиц.

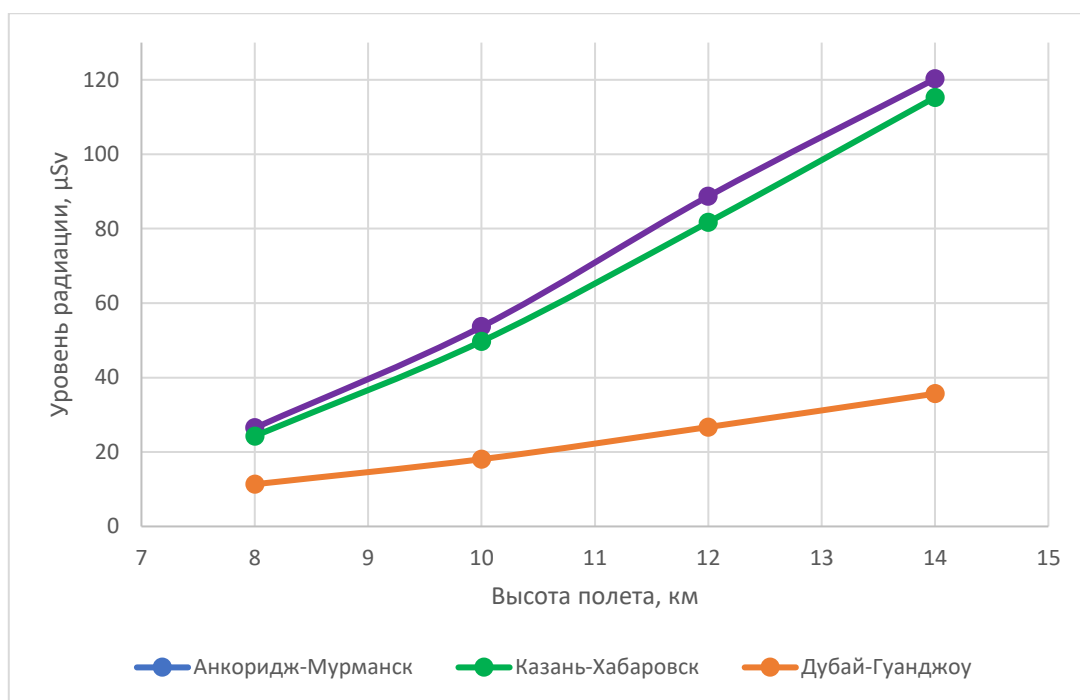


График 12 – Зависимость уровня радиации от высоты полета и широты при максимальной солнечной активности

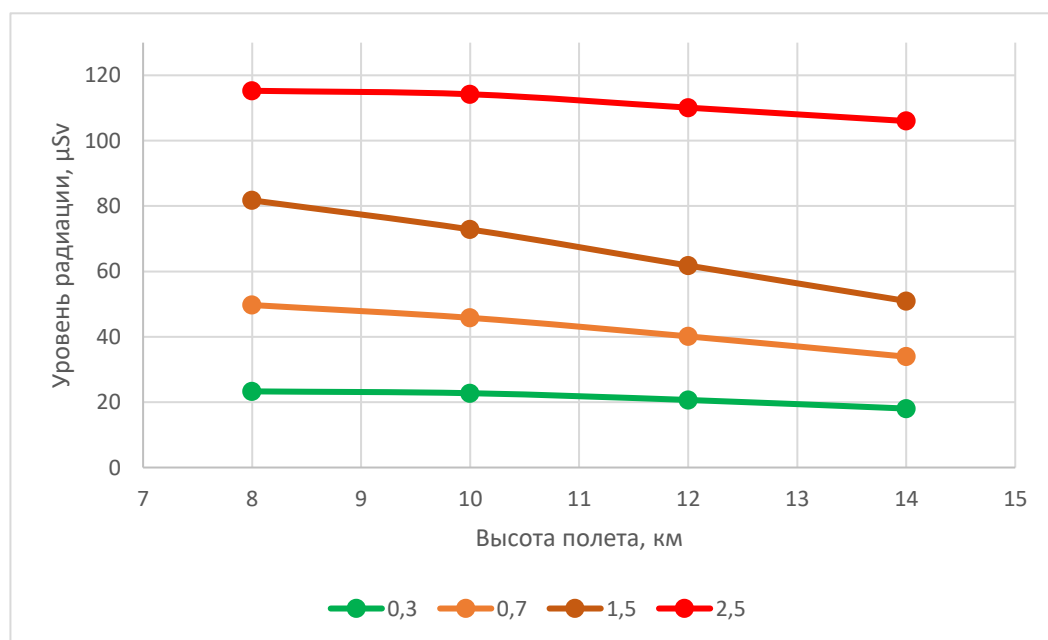


График 13 - Зависимость уровня радиации от высоты полета и солнечной активности при совершении полета в средних широтах

Очевидно, что радиация очень опасна, ее уровень необходимо отслеживать не только с помощью данных, полученных с бортов воздушных судов путем измерения счетчиком Гейгера или иных приборов, но и при помощи мониторинга ГКЛ и СКЛ, а также корональных выбросов масс и солнечных вспышек. Особенное внимание стоит уделять полетам в полярных широтах и на эшелонах, близких к потолку полета самолета, в средних широтах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В начале выпускной квалификационной работы была поставлена цель: исследовать элементы космической погоды как опасного для полетов авиации явления, ее влияние на воздушное судно, способы прогнозирования и предупреждения опасных гелиогеофизических событий.

Были сделаны следующие выводы:

- 1) За период сентябрь 2020 – январь 2023 гг. зафиксировалось 92 консультативных сообщения. Архив сообщений является не полным из-за труднодоступности SWX;
- 2) Чаще всего консультативные сообщения выпускались с сентября по январь, реже всего — с февраля по август;
- 3) Чаще всего консультативные сообщения выпускались на умеренное ухудшение высокочастотной связи (34%). Сообщения о разной степени ухудшении спутниковой навигации занимают практически равные проценты (умеренное 27%; сильное 26%). Реже всего выпускались сообщения на сильные ухудшения высокочастотной связи. За период сентябрь 2020 – январь 2023 не было выпущено ни одного сообщения о повышенной радиационной опасности;
- 4) Чаще всего консультативные сообщения выпускались по северному полушарию (62%), по южному полушарию 38%;
- 5) Чаще всего консультативные сообщения выпускались по высоким широтам (40%), с незначительной разницей в процентах сообщения выпускались по экваториальным (30%) и средним (28%) широтам;
- 6) Текущий двадцать пятый солнечный цикл начался в 2020 году, его активность будет возрастать вплоть до конца 2025 года;
- 7) В двадцать пятом солнечном цикле наблюдалось 2074 солнечных пятна, 657 солнечных бурь класса C, 36 солнечных бурь класса M, 2 солнечных

бури X-класса. В текущем 2023 году прогнозируется 136 солнечных пятна, 224 бури класса C, 39 бурь класса M, 3 бури класса X;

8) В двадцать пятом солнечном цикле наблюдалось 77 геомагнитных бурь G1-класса, 13 бурь G2-класса, 3 бури G3-класса, 1 буря G4-класса (в 2021 году). Бурь класса G5 не наблюдалось;

9) Было доказано, что в дни, когда планетарные индексы Kp и Ap были больше 4 и 50 соответственно, были обосновано выпущены консультативные сообщения;

10) 3-4 ноября 2021 года были обоснованно выпущены консультативные сообщения на ухудшение высокочастотной связи в полярных шапках, затем по всему северному полушарию, что было связано с мощными солнечными вспышками и сильной геомагнитной бурей, что подтвердилось моделью ионосферы GAMBIT;

11) 11-12 октября 2021 года были обосновано выпущены консультативные сообщения на ухудшение спутниковой навигации в некоторых регионах северного полушария, что было подтверждено данными с приемника Septentrio PolaRx5, установленного в Апатитах;

12) На основании метода расчета от ИПГ им. Фёдорова было доказано, что уровень радиации возрастает с высотой, а также по мере движения с экватора к полярным шапкам. Кроме того, чем сильнее солнечная активность, тем выше опасность уровня радиации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белаховский В.Б. Влияние ионосферных возмущений на сцинтилляции ГЛОНАСС/GPS сигналов в авроральных широтах. / В.Б. Белаховский, П.А. Будников, С.В. Пильгаев, В.А. Билин, А.В. Лосев // «Physics of Auroral Phenomena». Апатиты. – 2022. – С.106-109.
2. Бернгардт О.И. Влияние факторов космической погоды на работу радиосредств / О.И. Бернгардт // Солнечно-земная физика. – 2017. – Т.3, №3. – С. 40-60.
3. Буров В.А. Космическая погода и авиаперевозки / В.А. Буров, В.Б. Лапшин, А.В. Сыроешкин // Мир измерений. – 2013. – 2. – С. 11-16.
4. Витинский Ю.И. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. / Ю. И. Витинский, М. Копецкий, Г. В. Куклин // М.: Наука, 1986. — 201 с.
5. Дёминов М.Г. Ионосфера. / М.Г. Дёминов, Ю.С. Осипов // М.: Большая российская энциклопедия, 2004-2017.
6. Демьянов В.В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем / В.В. Демьянов, Ю.В. Ясюкевич // Солнечно-земная физика. – 2021. – Т.7, №2. – С.30-52.
7. Козелов Б.В. Статистика измерения радиации в атмосфере на высотах рейсовых самолетов в 2017-2018 годах / Б.В. Козелов // «Physics of Auroral Phenomena». Апатиты. – 2019. – С.126-129.
8. Куражковская Н.А. Глобальная возмущенность магнитосферы земли и ее связь с космической погодой / Н.А. Куражковская // Солнечно-земная физика. – 2020. – Т.6, №1. – 51-62 с.
9. Международная организация гражданской авиации. Руководство по информации о космической погоде для обеспечения международной аэронавигации // Квебек, Канада. – 2019. – С50.

10. Морозова М.А. Дозиметрия при авиаперелётах / М.А. Морозова, В.Б. Лапшин, С.В. Доренский, А.В. Сыроешкин // Гелиогеофизические исследования. – 2014. – 10. – С.45-92.
11. Рябева Е.В. Контроль дозы и спектра нейтронов на высотах авиаперелетов / Е.В. Рябева, В.А. Идалов, В.Т. Минлягареев, В.Л. Кравченко // Гелиогеофизические исследования. – 2020. – 25. – С.37-44.
12. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Временный инструктивный материал по космической погоде // Москва. – 2019. – С.61.
13. URL: <https://www.spaceweatherlive.com/ru.html> (дата обращения 01.02.2023)
14. URL: <http://space-weather.ru/#/> (дата обращения 01.02.2023)
15. URL: <https://www.nasa.gov/> (дата обращения 01.02.2023)
16. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/> (дата обращения 01.02.2023)
17. URL: <https://www.sidc.be/> (дата обращения 01.02.2023)
18. URL: <https://glonass-iac.ru/> (дата обращения 01.02.2023)
19. URL: <https://pecasus.eu/> (дата обращения 01.02.2023)
20. URL: <https://www.kakioka-jma.go.jp/> (дата обращения 01.02.2023)
21. URL: <https://www.gfz-potsdam.de/> (дата обращения 01.02.2023)
22. Astafyeva E. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview / Elvira Astafyeva, Matthias Förster // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 120 (10). – 2015.
23. Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1 / Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. –1859. – 20. – С.13
24. Kimball, D. S. A Study of the Aurora of 1859. Geophysical Institute at the University of Alaska. Retrieved 28 November 2021.
25. Knipp, Delores J. Smart on the Little-Known Consequences of the 4 August 1972 Ultra-Fast Coronal Mass Ejecta: Facts, Commentary and Call to Action / B. J. Fraser, M. A. Shea, D. F. Smart // Space Weather. – 2018. – 16 (11). – PP.1635–1643.