



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Влияние космической погоды на безопасность полетов воздушных
судов»

Исполнитель Титова Татьяна Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(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» июня 2024 г.

Санкт-Петербург
2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1.ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ	5
1.1 Солнце как основной источник космической погоды.....	5
1.2 Солнечный ветер	5
1.3 Солнечные вспышки и корональный выброс масс	6
1.4 Космические лучи	12
1.5 Солнечные пятна и солнечная активность	15
1.6 Магнитосфера Земли.....	18
1.7 Ионосфера Земли	20
1.8 Индексы геомагнитной активности	23
2.ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА АВИАЦИЮ	29
2.1 Влияние космической погоды на высокочастотную связь	29
2.2 Влияние космической погоды на навигацию и наблюдение на основе GNSS.....	30
2.3 Влияние космической погоды на радиацию.....	32
2.4 Обеспечение авиационных пользователей информацией о космической погоде	36
3.АНАЛИЗ КОНСУЛЬТАТИВНЫХ СООБЩЕНИЙ О ВЛИЯНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ	39
3.1 Анализ консультативных сообщений на основе архива за ноябрь 2023 – май 2024 гг.....	39
3.2 Анализ влияния космической погоды на высокочастотную связь	45
3.3 Анализ влияния космической погоды на навигацию и наблюдение на основе GNSS.....	53
3.4 Анализ влияния космической погоды на радиацию	57
3.5 Алгоритм составления SIGMET сообщения	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	66

СОКРАЩЕНИЯ

ACE	- Advanced Composition Explorer
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
MNH	- средние широты северного полушария
MSN	- средние широты южного полушария
MUF	- Maximum Usable Frequency (максимально применимая частота)
NASA	- Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства
NOAA	- Национальная администрация по океану и атмосфере
SDO	- Solar Dynamics Observatory
SOHO	- Solar and Heliospheric Observatory
SWPC	- Space Weather Prediction Center (Международные глобальные центры космической погоды)
ИКАО	- Международная организация гражданской авиации
ОГЯ	- опасные гелиогеофизические явления
ППШ	- поглощения полярной шапки
ПЭС	- полное электронное содержание

ВВЕДЕНИЕ

Космическая погода — это процессы, происходящие на Солнце и в магнитосфере, ионосфере, термосфере, которые потенциально могут влиять на производительность и надежность космических и наземных технологических систем и могут угрожать жизни или здоровью людей. Космические погодные явления, которые касаются коммерческих воздушных судов и космических операций — это в основном те, которые нарушают работу операционных систем и повышают радиационную обстановку. Галактические космические лучи (ГКЛ), корональные выбросы масс (КВМ), отключение радиосвязи из-за солнечных вспышек, геомагнитные бури и ионосферные бури — вот некоторые из терминов, которые станут привычными для авиационной промышленности.

Целью выпускной квалификационной работы является анализ влияния космической погоды на безопасность полётов воздушных судов. Для достижения этой цели необходимо выполнить ряд задач:

1. собрать архив данных консультативных сообщений о космической погоде за период ноябрь 2023 – май 2024 гг;
2. проанализировать влияние солнечной активности на ионосферу и высокочастотную связь на примере геомагнитной бури и консультативных сообщений за 23-24 марта 2024 года;
3. проанализировать влияние солнечной активности на спутниковое позиционирование систем GPS на примере геомагнитных возмущений и консультативных сообщений за 23-24 марта 2024 года;
4. проанализировать влияние солнечной активности на радиационную обстановку 23-24 марта 2024 года;
5. составить алгоритм действия авиационного синоптика по выпуску SIGMET сообщения о космической погоде после получения консультативного сообщения.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

1.1 Солнце как основной источник космической погоды

Солнце — основной источник космической погоды, состоит преимущественно из водорода. В его ядре при температуре около 15 миллионов градусов происходит термоядерная реакция, превращающая водород в гелий и с выделением тепловой энергии. Эта энергия передается к фотосфере, где преобразуется в электромагнитное излучение. Выше фотосферы находится хромосфера, а ещё выше — корона, источник солнечного ветра.

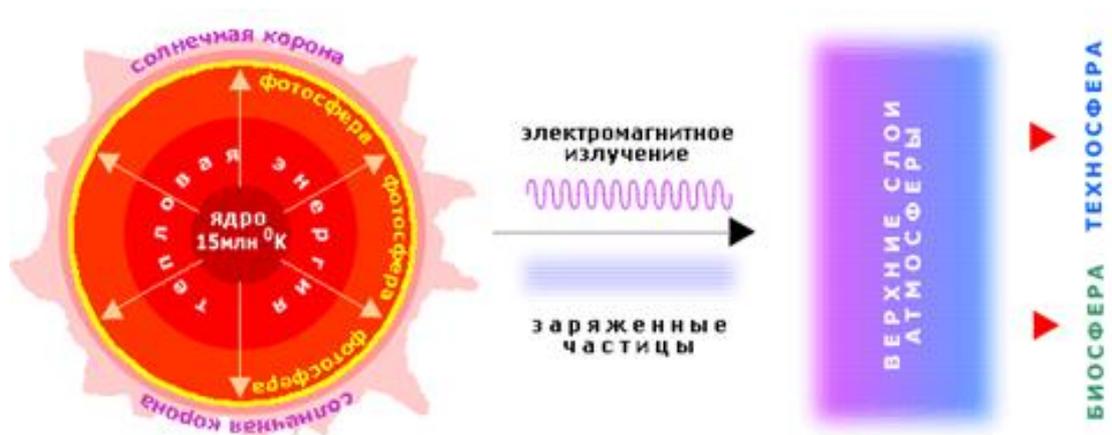


Рисунок 1 — Солнце как генератор космической погоды

Электромагнитное и корпускулярное излучения от Солнца, достигая земной орбиты, влияют на верхние слои атмосферы, что имеет последствия для техники и живых организмов на Земле и в космосе. Эти излучения могут напрямую воздействовать на объекты в околоземном и околосолнечном пространстве [1].

1.2 Солнечный ветер

Солнечный ветер — это поток ионизированной плазмы, состоящей из водорода, гелия и других элементов, выходящий из солнечной короны. Из-за высокой температуры короны, достигающей нескольких миллионов градусов, плазма расширяется и устремляется в космическое пространство.



Рисунок 2 — Корпускулярное излучение Солнца

Солнечный ветер переносит энергию, которая может воздействовать на геомагнитное поле Земли и вызывать различные космические погодные явления. Фотоны, испускаемые при солнечных вспышках, также играют важную роль, поскольку они несут значительное количество энергии в виде света и рентгеновских лучей. Корональные дыры, через которые выходит высокоскоростной солнечный ветер, создают условия для более интенсивного и энергичного потока плазмы. Если смотреть с Земли, Солнце вращается примерно за 27 дней, поэтому устоявшиеся структуры корональных дыр, сохраняющиеся в течение нескольких месяцев, будут проходить мимо Земли по графику, примерно каждые 27 дней.

Надо также особо отметить, что солнечный ветер может оказывать прямое кинетическое воздействие на космические аппараты, изменяя траекторию их движения [2].

1.3 Солнечные вспышки и корональный выброс масс

Солнечные вспышки — это внезапные всплески излучения, вызванные высвобождением магнитной энергии, и они могут излучать энергию во всем спектре электромагнитного излучения. Вспышки могут варьироваться по продолжительности и интенсивности, и их влияние на Землю зависит от их мощности и направленности.

Корональные выбросы масс (КВМ) — это огромные облака магнитной плазмы, выбрасываемые из солнечной короны. Они могут нести в себе значительное количество массы и магнитного поля, что делает их особенно важными для изучения, так как при достижении Земли они могут вызывать геомагнитные бури.

Изучение активных областей и предсказание солнечных извержений имеет важное значение для защиты спутников, космических аппаратов и наземных технологий от потенциально вредного воздействия космической погоды.

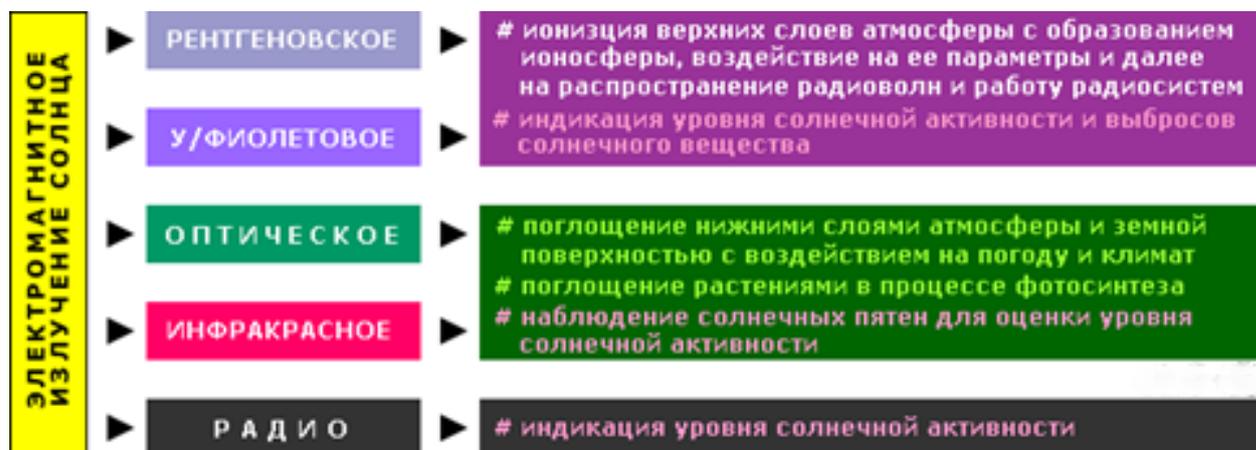


Рисунок 3 — Электромагнитное излучение Солнца

Интенсивность солнечных вспышек охватывает широкий диапазон и классифицируется по пиковому излучению в спектральном диапазоне 0,1–0,8 нм (мягкое рентгеновское излучение) с помощью прибора XRS (Solar X-Ray Sensor), который установлен на спутнике GOES.

Уровни рентгеновского потока начинаются с уровня «А» (номинально начиная с 10^{-8} Вт/м²). Следующий уровень, в десять раз выше, — уровень «В» (\geq

10^{-7} Вт/м²); за ними следуют вспышки «С» (10^{-6} Вт/м²), вспышки «М» (10^{-5} Вт/м²) и, наконец, вспышки «Х» (10^{-4} Вт/м²).

Всплески рентгеновского излучения классифицируются с использованием пятиуровневой шкалы космической погоды NOAA, которая напрямую связана с максимальным пиком мягкого рентгеновского излучения вспышки, достигнутым или ожидаемым. SWPC в настоящее время прогнозирует вероятность вспышек классов С, М и Х и соотносит её с вероятностью событий R1-R2, R3 или более высоких уровней.

Таблица 1 — Шкала интенсивности солнечных вспышек

R	Интенсивность	Последствия на различные системы	Мера	Средняя частота (1 цикл=11 лет)
R5	Экстремальная	ВЧ-радиосвязь: Полное поглощение в ВЧ-диапазоне на всей освещённой стороне Земли, продолжающееся несколько часов. Это приводит к отсутствию высокочастотной радиосвязи с морскими и лётчиками в данном секторе. Навигация: Низкочастотные навигационные сигналы, используемые морскими системами и системами авиации общего назначения, на освещенной стороне Земли перестают работать в течение многих часов, что приводит к ошибкам в определении местоположения. Увеличение ошибок спутниковой навигации при позиционировании в течение нескольких часов на освещенной стороне Земли, которые могут распространиться на неосвещённую сторону.	X20 (2×10^{-3}) Вт/м ²	Менее 1 за цикл
R4	Очень сильная	ВЧ-радиосвязь: Поглощение в ВЧ-диапазоне на большей части освещённой Солнцем стороны Земли, продолжающееся один-два часа. Отсутствие связи с кораблями и самолётами.	X10 (10^{-3}) Вт/м ²	8 дней за цикл

		Навигация: Нарушения в низкочастотных навигационных сигналах приводят к ошибкам в определении местоположения на освещенной стороне Земли в течение одного-двух часов. Небольшие ошибки в определении положения спутников на освещенной стороне Земли.		
R3	Сильная	ВЧ-радиосвязь: Обширные зоны нарушения радиосвязи в ВЧ-диапазоне на освещенной стороне Земли, продолжающееся примерно один час. Навигация: Нарушения в низкочастотных навигационных сигналах в течение одного часа.	X1 (10 ⁻⁴) Вт/м ²	140 дней за цикл
R2	Умеренная	ВЧ-радиосвязь: Ограниченные зоны нарушения ВЧ-радиосвязи на освещенной стороне на десятки минут. Навигация: Деграция на десятки минут низкочастотных навигационных сигналов.	M5 (5×10 ⁻⁵) Вт/м ²	300 дней за цикл
R1	Слабая	ВЧ-радиосвязь: Слабое или незначительное ухудшение ВЧ-радиосвязи на освещенной стороне. Навигация: НЧ-радиосвязи ухудшается на короткие промежутки времени.	M1 (10 ⁻⁵) Вт/м ²	950 дней за цикл

КВМ, в отличие от солнечных вспышек, трудно обнаружить, они не особенно яркие, и может потребоваться несколько часов, чтобы полностью покинуть Солнце. Из-за их относительно низкой яркости и большого объема, КВМ труднее обнаружить, чем солнечные вспышки, особенно без специализированного оборудования, такого как коронографы, используемые на космических аппаратах. Скорость КВМ может достигать **1000-1200 км/с**, что делает их одними из самых быстрых феноменов в солнечной системе. Эти выбросы могут вызывать значительные возмущения в магнитосфере Земли, особенно если они направлены в сторону нашей планеты. При столкновении с магнитным полем Земли, КВМ могут вызвать магнитные бури, которые, в свою очередь, могут привести к сбоям в работе спутников, радиосвязи и даже электросетей. Эра космических исследований и развитие технологий

значительно улучшили нашу способность наблюдать и предсказывать такие события, что имеет важное значение для защиты технологий и инфраструктуры от воздействия космической погоды.

Электромагнитное излучение действительно распространяется со скоростью света и достигает Земли примерно за восемь минут, что позволяет солнечной вспышке мгновенно воздействовать на дневную сторону Земли. С другой стороны, КВМ движутся значительно медленнее, и их время в пути от Солнца до Земли может занимать от 1 до 4 дней, в зависимости от их скорости и направления. Это означает, что у ученых есть возможность предупредить о возможных геомагнитных бурях, вызванных КВМ, что критически важно для защиты спутниковой и другой техники от воздействия космической погоды.

Важными параметрами КВМ, используемыми в анализе, являются размер, скорость и направление. Эти свойства выводятся из коронографических снимков орбитальных спутников синоптиками SWPC для определения вероятности столкновения с Землей. Солнечная и гелиосферная обсерватория НАСА (SOHO) оснащена коронографом, известным как Большой угловой и спектрометрический коронограф (LASCO). Этот прибор имеет два диапазона для оптической съемки солнечной короны: C2 (охватывает диапазон расстояний от 1,5 до 6 солнечных радиусов) и C3 (диапазон от 3 до 32 солнечных радиусов). Инструмент LASCO в настоящее время является основным средством, используемым прогнозистами для анализа и классификации корональных выбросов.

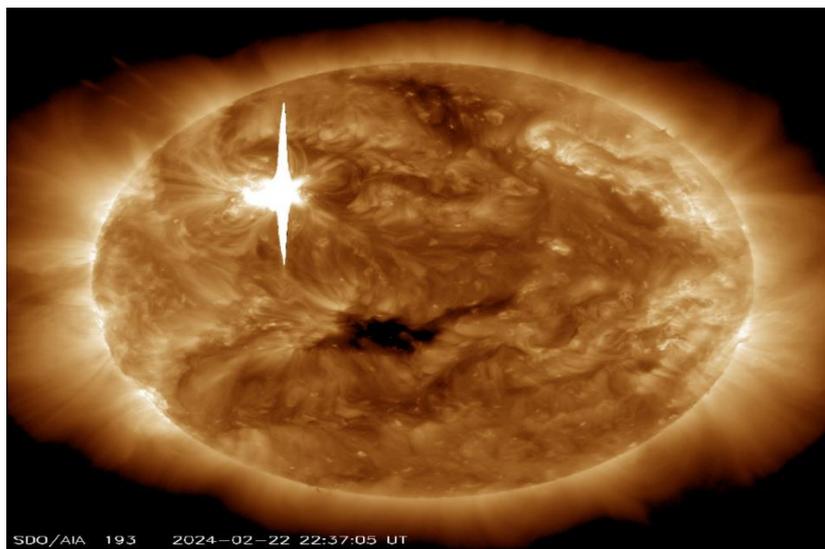


Рисунок 4 — Стереоскопическое изображение Солнца, полученное с аппарата SDO в длине волны 193 Ангстрем за 22.02.2024

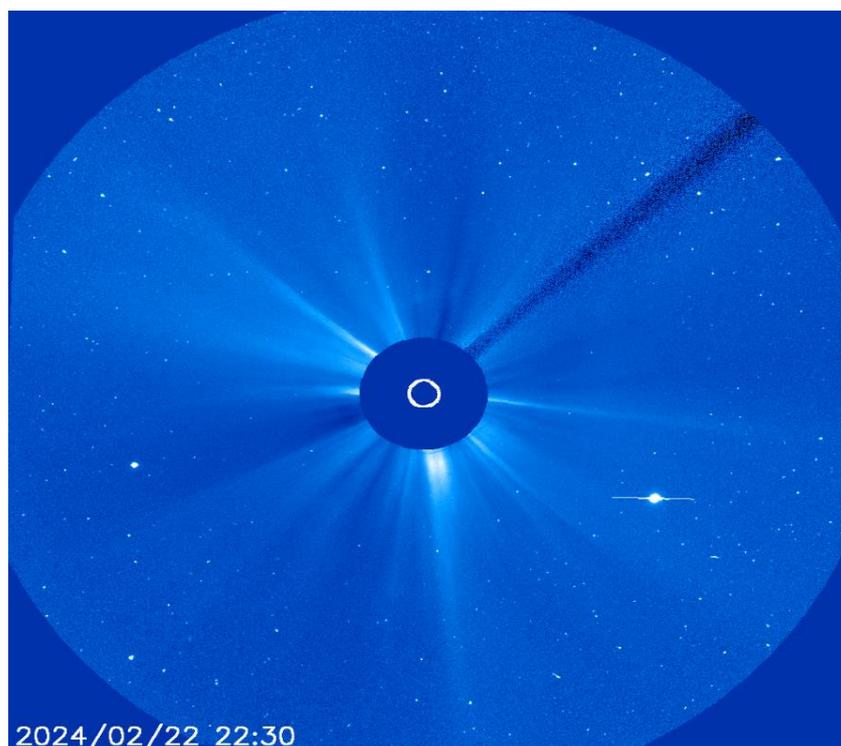


Рисунок 5 — Изображение с коронографа LASCO за 22.02.2024

Частота солнечных вспышек и КВМ зависит от солнечного цикла. Частота вспышек порядка 25 в день может наблюдаться во время максимальной фазы солнечного цикла, в то время как при солнечном минимуме может потребоваться шесть месяцев или более, чтобы произошло 25 вспышек. Частота КВМ

варьируется примерно от 5 в день вблизи солнечного максимума до одного в неделю или дольше при солнечном минимуме. Однако многие КВМ, наблюдаемые при отрыве от Солнца, не направлены на Землю и, следовательно, не имеют никакого значения для околоземных технологий [3].

1.4 Космические лучи

Энергичные частицы, такие как протоны, электроны и ядра, образующиеся в результате солнечных вспышек, могут взаимодействовать с межпланетной средой и достигать орбиты Земли. Эти частицы известны как солнечные космические лучи (СКЛ). Солнечные вспышки являются одним из основных источников СКЛ, но, как вы упомянули, межпланетные ударные волны также играют значительную роль в генерации космических лучей. Эти ударные волны могут возникать, например, когда быстрые КВМ догоняют более медленные потоки плазмы в межпланетном пространстве, создавая условия для ускорения частиц до высоких энергий.

Проблемы генерации СКЛ и их распространения в короне и межпланетной среде ещё далеки от решения. Это связано с большим разнообразием условий в межпланетной среде и короне. Достаточно часто на временное развитие солнечного протонного события (СПС) влияют ударные волны, длительное проникновение частиц, а также удержание и истечение частиц из магнитных ловушек. Описание и прогноз временного развития СПС представляет до сих пор достаточно сложную и не решённую задачу.

Солнечные космические лучи представляют собой значительную радиационную опасность, особенно в контексте космических полётов и работы спутников. Солнечные протоны с энергией 20-500 МэВ могут вносить значительный вклад в суммарную дозу радиации, которую получают космонавты и электроника на борту космических аппаратов. Магнитное поле Земли сильно ослабляет потоки протонов, достигающих высот обитаемых пилотируемых аппаратов и самолётов на больших высотах. Однако в полярных

шапках, где силовые линии магнитного поля Земли открыты, потоки протонов могут быть почти такими же интенсивными, как и в космосе вне магнитосферы [4].

Звёзды, подобно нашему Солнцу, испускают излучение, которое может достигать Земли и влиять на околоземное пространство и верхние слои атмосферы. Электромагнитное излучение от звёзд включает в себя видимый свет, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, а также радиоволны и рентгеновские лучи. Корпускулярное излучение состоит из потоков заряженных частиц, таких как протоны и электроны, которые могут воздействовать на магнитосферу и атмосферу Земли. Межзвёздное пространство содержит диффузную материю, включая межзвёздный газ и пыль, а также различные туманности. Эти материалы могут поглощать, рассеивать и излучать энергию, внося свой вклад в общий фон электромагнитного излучения в галактике. Кроме того, под воздействием внешних излучений, таких как сверхновые, эти материалы могут стать источниками дополнительного излучения.

Галактические космические лучи (ГКЛ) — это потоки ядер и электронов, приходящих из межзвёздного пространства. В области энергий от 10^4 до 10^9 МэВ, поток ГКЛ действительно является постоянным, и их спектр можно описать степенной функцией с показателем примерно – 2,75. Это означает, что количество частиц уменьшается с увеличением их энергии. Однако в области энергий 10^2 - 10^4 МэВ, поток ГКЛ подвержен влиянию солнечной активности, которая модулируется гелиосферой — областью вокруг Солнца, заполненной солнечным ветром. В периоды низкой солнечной активности, когда число Вольфа находится на минимуме, гелиосфера менее возмущена, что позволяет большему количеству галактических космических лучей достигать внутренних областей солнечной системы и, соответственно, Земли.

Это особенно важно для космических и авиационных полётов, поскольку в периоды минимума солнечной активности ГКЛ могут значительно увеличивать дозовые нагрузки на космонавтов и авиационный персонал. Поэтому понимание

и прогнозирование потоков ГКЛ имеет критическое значение для планирования безопасных космических миссий и полётов.

Процессы солнечной модуляции действительно сложны и не ограничиваются только антикорреляцией с числом Вольфа. Они включают в себя множество факторов, таких как изменения в солнечном ветре, магнитных полях и других явлениях, которые влияют на распространение и интенсивность ГКЛ.

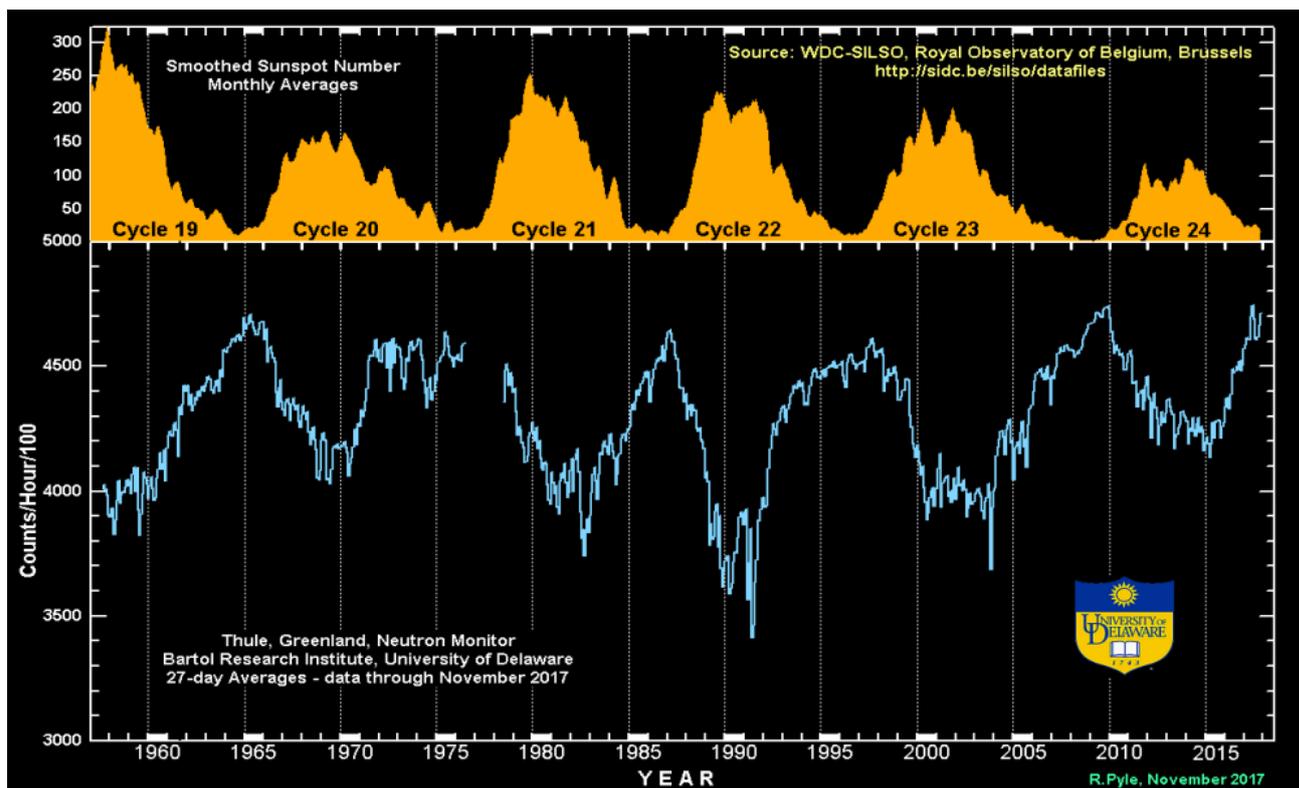


Рисунок 6 — Взаимосвязь между солнечными циклами, проиллюстрированная солнечными пятнами (верхняя панель) и нейтронами, измеренными на уровне моря с помощью ГКЛ (нижняя панель)

Когда первичные космические лучи, которые являются высокоэнергетическими частицами из космоса, входят в атмосферу Земли, они сталкиваются с атомами воздуха, что приводит к каскаду реакций. В результате этих столкновений образуются вторичные частицы, такие как мюоны, пионы и каоны, которые в свою очередь могут столкнуться с другими атомами и создать дополнительные вторичные частицы. Весь процесс называется атмосферным ливнем [4].

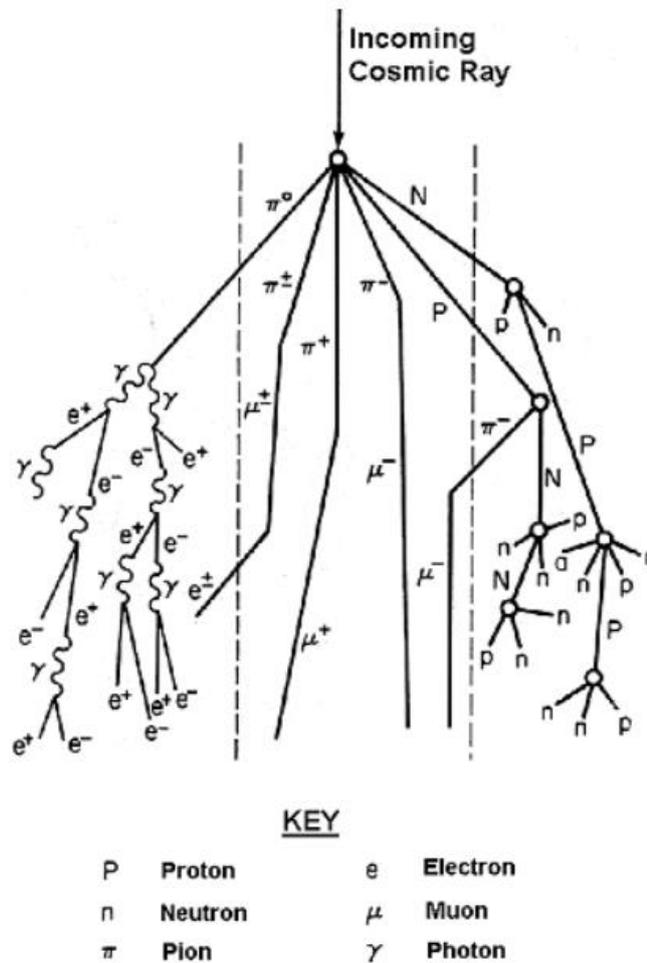


Рисунок 7 — Приходящий космический луч

1.5 Солнечные пятна и солнечная активность

Солнечная активность оказывает значительное влияние на околосолнечное и околоземное пространство, а также на различные сферы Земли. Уровень солнечной активности связан с процессами в солнечной атмосфере и с величиной солнечного магнитного поля. Для оценки уровня солнечной активности используются различные индикаторы. Один из наиболее известных — это уровень радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, также известный как F10.7 индекс. Этот индекс коррелирует с числом солнечных пятен и общей солнечной активностью, и он используется для оценки состояния ионосферы Земли и прогнозирования космической погоды.

Мощность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см хорошо коррелирует с суммарной площадью солнечных пятен и уровнем ультрафиолетового излучения. Данный факт был установлен экспериментально канадскими астрофизиками, положившими начало радиоастрономии по окончании Второй Мировой Войны, измеряя радиоизлучение звезд и Солнца с помощью радиоприемника военного радара, работающего на указанной длине волны. Параметру потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см было присвоено обозначение F10.7. Мерой его измерения является стандартная единица спектральной плотности потока солнечного электромагнитного излучения sfu (solar flux unit), равная 10^{-22} (Вт/м² × Гц). Изменяется F10.7 в весьма широких пределах — от 50 sfu при минимуме солнечной активности до 300 sfu при её максимуме [1].

Дата	Время	Юлианский день	Вращение Кэррингтона	Наблюдаемый поток	Скорректированный поток	URSI Flux
2024-01-01	18:00:00	2460311.239	2279.390	134.1	129.7	116.7
2024-01-01	20:00:00	2460311.322	2279.390	135.7	131.2	118.1
2024-01-01	22:00:00	2460311.406	2279.400	134.5	130.1	117.1
2024-01-02	18:00:00	2460312.239	2279.430	145.4	140.6	126.6
2024-01-02	20:00:00	2460312.322	2279.430	142.1	137.4	123.6
2024-01-02	22:00:00	2460312.406	2279.430	137.7	133.2	119.8
2024-01-03	18:00:00	2460313.239	2279.460	134.5	130.1	117.1
2024-01-03	20:00:00	2460313.322	2279.470	140.2	135.5	122.0

Рисунок 8 — Данные по F10.7, предоставляемые сервисом космической погоды Канады

Солнечные пятна — это области на поверхности Солнца с пониженной светимостью. Их можно наблюдать невооруженным глазом. Солнечные пятна возникают в местах локального повышения плотности магнитных силовых линий собственного магнитного поля Солнца и, как правило, связывают два

солнечных пятен, находящихся в разных полушариях, то есть из одного пятна такие линии выходят, а в другое заходят. Они как бы являются индикаторами зон повышенной напряжённости магнитного поля Солнца, которое в целом является первичным индикатором его энергетической активности. Активные области, связанные с группами солнечных пятен, обычно видны как яркие усиления в короне в спектре ультрафиолетового излучения и рентгеновских лучей. SWPC Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) в США обозначает, то есть нумерует, активные регионы для общего использования сообществом специалистов по космической погоде.

Длительными наблюдениями установлено, что число солнечных пятен приблизительно соответствует уровню солнечной активности. Для более точных оценок учитывается ещё и число групп солнечных пятен и их конфигурация, суммарная площадь в миллионных долях солнечного диска, а также число Вольфа, вычисляемое по формуле $W = k(f+10g)$, где f – число всех отдельных пятен в данный момент, наблюдаемых на солнечном диске, $10g$ – удесятерённое число образованных ими групп, k – индивидуальный коэффициент обсерватории, предоставившей данные, учитывающий её технические возможности [1].

Официальное ежедневное и ежемесячное количество солнечных пятен определяется WDC-SILSO в Королевской обсерватории Бельгии.

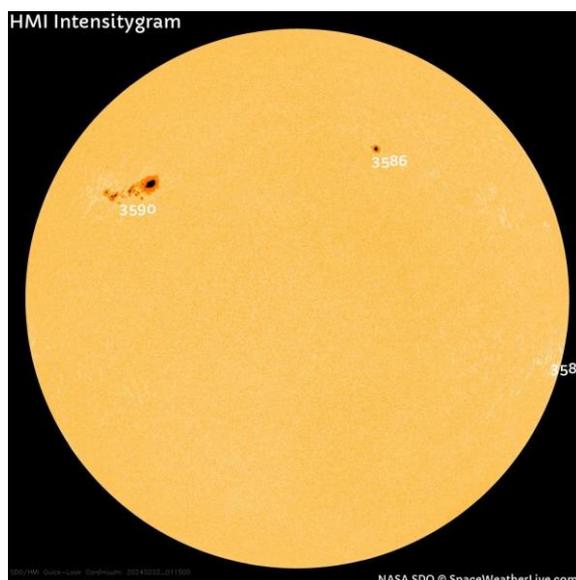


Рисунок 9 — Солнечные пятна за 22.02.2024

В среднем солнечные пятна появляются и исчезают в течение 11 лет. Величина и продолжительность отдельных циклов различаются, но обычно больше извержений происходит вблизи максимума солнечной активности, а вблизи минимума солнечной активности наблюдаются лишь немногие. Все солнечные электромагнитные излучения, от радио до рентгеновских лучей, также сильнее во время солнечного максимума и менее интенсивны вблизи солнечного минимума [2].

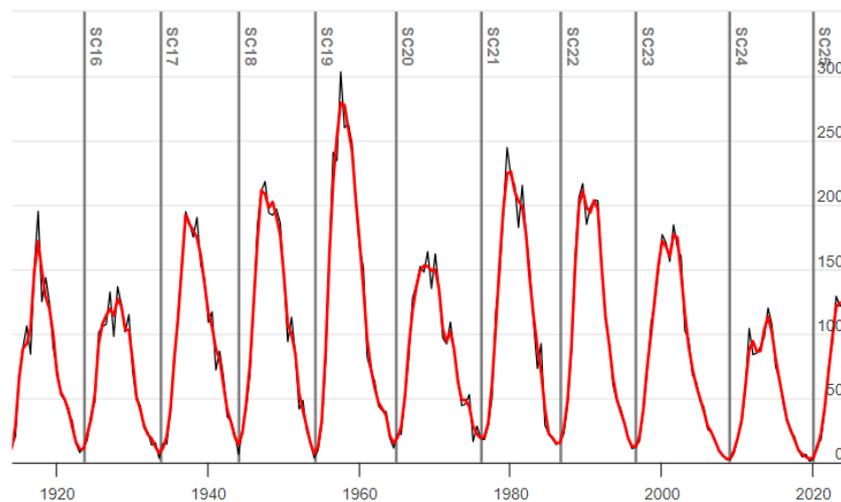


Рисунок 10 — Солнечная цикличность за последний век

Солнечным циклам начали присваиваться последовательные номера. Это присвоение номеров началось с первого солнечного цикла в 1755 году, а сейчас идёт 25-й цикл, который начался в декабре 2019 года и предполагается, что в июле 2025 года он достигнет максимума. Считается, что новый солнечный цикл начался с появления групп солнечных пятен в более высоких широтах с магнитной полярностью ведущих пятен, противоположной магнитной полярности предыдущего цикла.

1.6 Магнитосфера Земли

Магнитосфера играет ключевую роль в защите нашей планеты от солнечного ветра и космического излучения. Вот некоторые ключевые моменты:

- Магнитное поле Земли действует как защитный щит, отклоняя частицы солнечного ветра и космические лучи.
- Радиационные пояса Ван Аллена содержат заряженные частицы, захваченные магнитным полем Земли, и представляют собой два основных слоя, которые защищают нас от вредного излучения.
- Из-за взаимодействия с солнечным ветром форма магнитосферы не является стабильной и изменяется, создавая магнитный хвост на ночной стороне Земли.
- Магнитопауза — это граница между магнитным полем Земли и солнечным ветром, и она постоянно колеблется в ответ на изменения в солнечном ветре.

Эти аспекты магнитосферы имеют огромное значение для космической погоды и могут влиять на работу спутников, космические полеты и даже на технологии на Земле, такие как радиосвязь и навигационные системы [5].

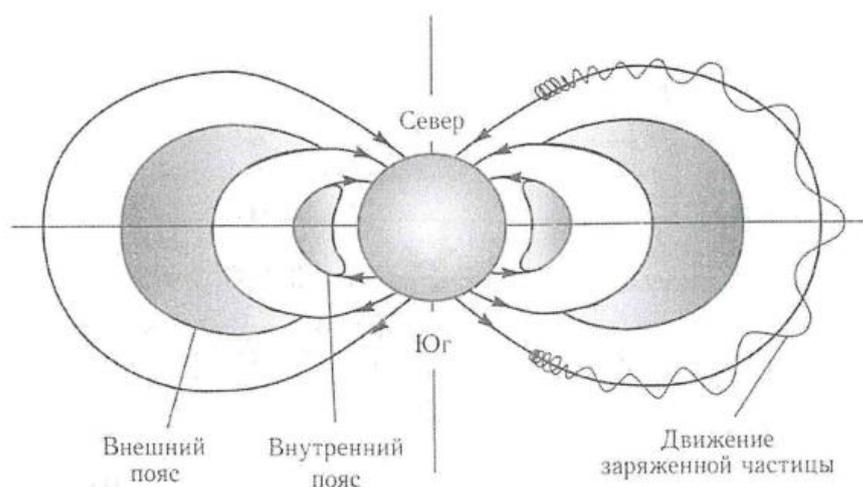


Рисунок 11 — Радиационные пояса Земли

Явление, вызывающее наибольшее возмущение в магнитосфере, называется «геомагнитной бурей». Это происходит, когда огромное количество энергии солнечного ветра попадает в магнитосферу.

Геомагнитные бури подразделяются на два типа в зависимости от структуры солнечного ветра, который их порождает. Один генерируется КВМ, которые представляют собой огромные выбросы плазмы и магнитного поля из солнечной короны другой генерируется высокоскоростным солнечным ветром, исходящими из корональных дыр, которые являются областями относительно низкой плотности и высокой температуры в солнечной короне. Когда эти солнечные явления взаимодействуют с магнитосферой Земли, они могут вызывать быстрые изменения в магнитном поле, что приводит к геомагнитным бурям. Эти бури могут вызывать различные эффекты, включая: сбои в работе спутников (из-за увеличения плотности верхней атмосферы, что увеличивает сопротивление и может привести к преждевременному выходу спутников из строя), проблемы с радиосвязью (так как ионосферные условия меняются, что может нарушить распространение радиоволн), воздействие на электросети (поскольку индуцированные геомагнитные токи могут повредить трансформаторы и другое оборудование электросетей). Сильные геомагнитные бури могут иметь серьезные последствия для технологических систем и инфраструктуры, особенно в высоких широтах, где магнитное поле Земли более слабое [7].

1.7 Ионосфера Земли

Ионосфера — это ионизированная часть атмосферы Земли. Большинство молекул атмосферного газа в ионосфере ионизируются ультрафиолетовым излучением Солнца. Кроме того, заряженные частицы из магнитосферы достигают атмосферы и вносят вклад в ионосферу. Ионосфера образует несколько слоев высотой от примерно 60 км до более 1000 км. Ионосфера является электропроводной. Следовательно, она отражает радиоволны на частотах менее 30 МГц, как тарелка или зеркало. Радиоволны более высокой частоты – до 10 ГГц – могут проходить через ионосферу, но они подвергаются модификации. Электрические токи, протекающие на этих высотах, изменяют

геомагнитное поле, вызывают эффекты напряжения на земле и нагревают ионосферу.

Ионосфера Земли очень динамична и подвержена влиянию множества факторов. Суточные изменения солнечной радиации оказывают значительное влияние на уровень ионизации, что приводит к более высокой плотности ионосферы после полудня и к её уменьшению перед восходом солнца. Эти изменения аналогичны суточным колебаниям температуры на поверхности Земли. Сезонные и географические факторы также играют важную роль, поскольку угол падения солнечных лучей и продолжительность дня меняются в зависимости от времени года и широты. Это приводит к различиям в ионосферной плотности, которые могут влиять на радиосвязь и навигационные системы. Долговременные изменения в ионосфере связаны с 11-летним солнечным циклом, в течение которого активность Солнца колеблется от минимума до максимума. В периоды повышенной солнечной активности увеличивается количество солнечного излучения и, соответственно, уровень ионизации в ионосфере. На высотах свыше 200 км, как вы упомянули, движение ионосферной плазмы действительно контролируется магнитным полем Земли. Силовые линии магнитного поля направляют движение заряженных частиц, что важно для понимания поведения ионосферы и взаимодействия с магнитосферой [5].

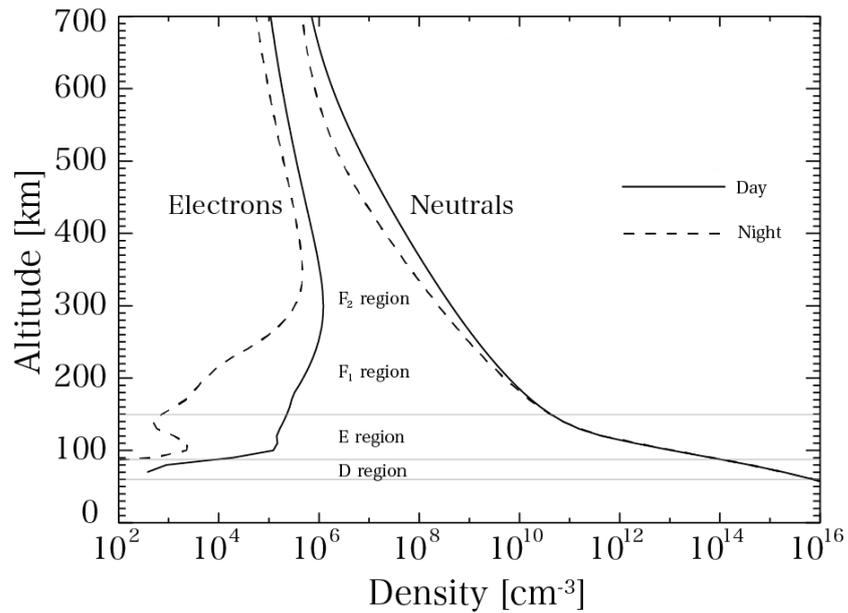


Рисунок 12 — Профиль плотности ионосферы

Ионосферная буря — это явление, при котором плотность электронов значительно уменьшается или увеличивается в области F, где содержится большая часть электронов в ионосфере. Известно, что явление возникает при возникновении возмущения магнитосферы и его влияние передается в ионосферу через различные процессы, например, через возмущения состояния фоновой нейтральной атмосферы (термосферы) и электрических полей, действующих на ионосферу.

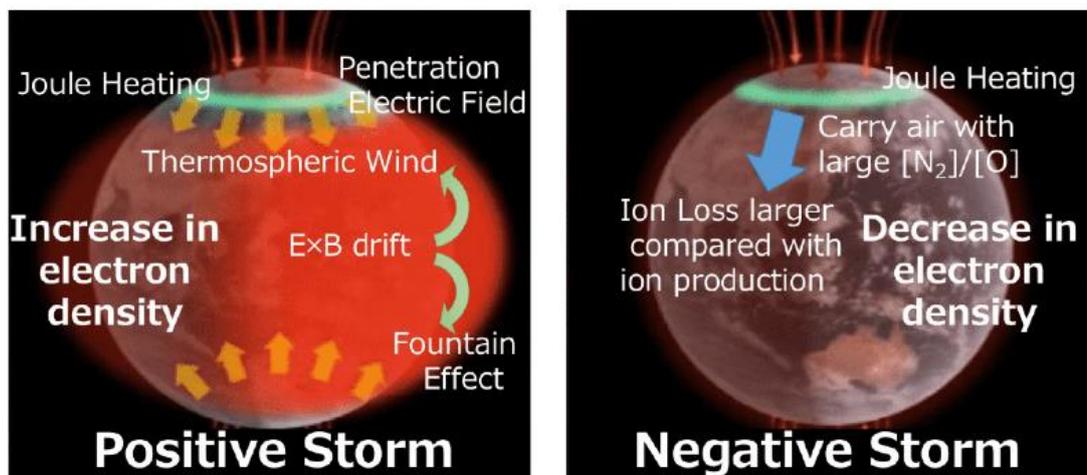


Рисунок 13 — Положительные (слева) и отрицательные (справа) ионосферные бури

На рисунке 13 показано состояние ионосферы Земли во время ионосферной бури; левая и правая панели соответствуют «положительным» и «отрицательным» бурям, в которых электронная плотность F-области испытывает значительное увеличение и уменьшение соответственно. Отрицательные бури обычно связаны с изменениями в составе атмосферы, вызванными нагреванием полярной термосферы и её расширением к более низким широтам. С другой стороны, положительные бури возникают из-за поднятия ионосферного слоя под воздействием электрического поля, проникающего из магнитосферы, и экваториального термосферного ветра, вызванного магнитосферным возмущением.

При возникновении отрицательной бури, уменьшение критической частоты F-области приводит к тому, что радиоволны, которые обычно отражаются ионосферой, могут не отражаться в зависимости от их частоты. При возникновении положительной бури, поскольку распространение радиоволн через ионосферу еще больше задерживается, что может привести к увеличению ошибки позиционирования спутников [8].

1.8 Индексы геомагнитной активности

Численной характеристикой, отражающей геомагнитные возмущения, являются различные геомагнитные индексы — Dst, Kp, Ap, AA и другие. Базовым в системе геомагнитных индексов является K-индекс, введенный в практику в середине XX века Дж. Бартельсом. Этот индекс позволяет оценить степень возмущенности геомагнитного поля Земли и используется для мониторинга геомагнитной активности.

K-индекс имеет десять уровней, которые отражают различные степени возмущения геомагнитного поля, от нулевых пульсаций до максимально возможных для данной местности. Эти уровни определяются на основе максимального колебания горизонтальной компоненты магнитного поля,

измеряемого в нанотеслах (нТл), и варьируются в зависимости от географического положения обсерватории.

Таблица преобразования максимального колебания в К-индекс действительно различается для разных обсерваторий, что позволяет учитывать геомагнитную широту и обеспечивает сопоставимость данных по всему миру. Например, для обсерватории в Годгавне, Гренландия, значение в 1500 нТл будет соответствовать К-индексу 9, в то время как для Гонолулу, Гавайи, такое же значение К-индекса будет соответствовать всего лишь 300 нТл.

Для увеличения разрешения данной шкалы предусмотрена возможность введения в каждом интервале двух дополнительных уровней, что увеличивает число делений шкалы с 10 до 28, при этом в значениях шкалы используются дополнительные индексы «о» (буква), «+» (плюс) и «-» (минус). Так, значение X_o соответствует значению X основной шкалы, $X+$ соответствует значению X , увеличенному на $1/3$ от верхнего интервала, $X-$ соответствует значению X , уменьшенному на $1/3$ от нижнего интервала [1].

Для усредненной оценки возмущенности геомагнитного поля в региональном или глобальном масштабах используется планетарный (planetary) К-индекс, обозначаемый K_p , также предложенный Бартельсом. Он вычисляется путем усреднения К-индексов группы обсерваторий средних широт, и рассчитывается он каждые три часа.

Шкала геомагнитных бурь NOAA была представлена в 1999 году как способ донести до широкой публики текущие и будущие условия космической погоды и их возможное воздействие на людей и системы. Многие продукты SWPC описывают космическую среду, но лишь немногие описывают эффекты, которые могут возникнуть в результате возмущений окружающей среды. Шкала приведена в качестве таблицы ниже [6].

Таблица 2 — Шкала интенсивности геомагнитных бурь

G	Интенсивность геомагнитной бури	Последствия на различные системы	Kp	Средняя частота (1 цикл=11 лет)
G5	Экстремальная	<p>Энергетические системы: могут возникнуть широко распространенные проблемы с контролем напряжения и проблемы с системами защиты, некоторые сетевые системы могут столкнуться с полным коллапсом или отключением электроэнергии. Трансформаторы могут быть повреждены.</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 могут достигать сотен ампер, распространение ВЧ (высокочастотной) радиосвязи может быть невозможно во многих районах в течение одного-двух дней, спутниковая навигация может ухудшиться на несколько дней, низкочастотная радионавигация может быть отключена на несколько часов и полярное сияние может наблюдаться в экваториальных широтах.</p>	Kp =9	4 дня за цикл
G4	Очень сильная	<p>Энергетические системы: широко распространены проблемы с контролем напряжения; 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; распространение ВЧ-радиосигналов носит спорадический характер, спутниковая навигация ухудшается на несколько часов, нарушается низкочастотная радионавигация, а</p>	Kp =8	60 дней за цикл

		полярные сияния могут наблюдаться в тропических широтах.		
G3	Сильная	<p>Энергетические системы: может потребоваться коррекция напряжения системы, на некоторых защитных устройствах срабатывают ложные сигнализации.</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>	Кр =7	130 дней за цикл
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: замирания высокочастотных радиоволн в высоких широтах; полярные сияния фиксируются в широтах до 50-55°.</p>	Кр =6	360 дней за цикл
G1	Слабая	<p>Энергетические системы: могут возникнуть слабые колебания в электросети.</p> <p>Функционирование КА: возможно незначительное влияние на работу спутников.</p> <p>Другие системы: полярные сияния преимущественно в высоких широтах; заметны изменения в миграции животных.</p>	Кр =5	900 дней за цикл

Существуют также индексы aa, AA, ap, Ap. Они представляют собой аналоги K и Kp индексов, но имеют линейную шкалу, что предпочтительнее для целого ряда прикладных задач. Индексы aa и ap являются линейными аналогами

индексов К и К_p, а индексы А и А_p являются их среднесуточными значениями. Взаимное соответствие К- и aa-индексов определяется следующим рядом, близким (но не равным) к значениям геомагнитной индукции базовой шкалы К-индекса.

Таблица 3 — Эквивалентный диапазон aa для данного К

К	0	0+	1-	1	1+	2-	2	2+	3-	3	3+	4-	4	4+
aa	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
К	5-	5	5+	6-	6	6+	7-	7	7+	8-	8	8+	9-	9
aa	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

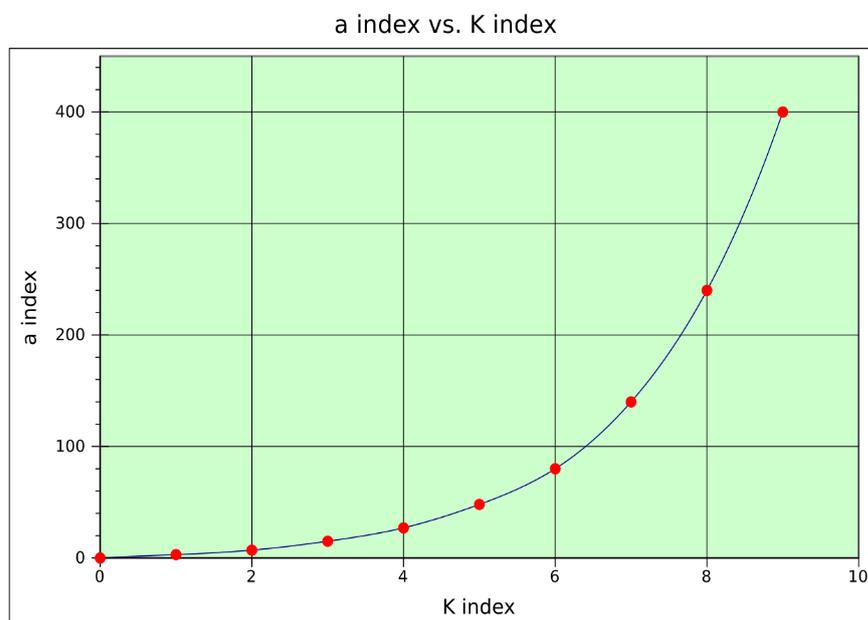


Рисунок 14 — Зависимость а - индекса от К – индекса

Dst-индекс предназначен для описания геомагнитных возмущений в низких широтах. Определяется путём усреднения среднечасовых данных 4-х низкоширотных станций - Какиока (Япония), Гонолулу (Гавайи, США), Сан Хуан (Пуэрто Рико) и Херманус (ЮАР). Измеряется в нанотеслах и имеет преимущественно отрицательные значения, что связано с особенностью низкоширотных геомагнитных возмущений. Данные по Dst в текстовом и графическом форматах публикуются мировым центром данных по геомагнетизму в Киото [1].

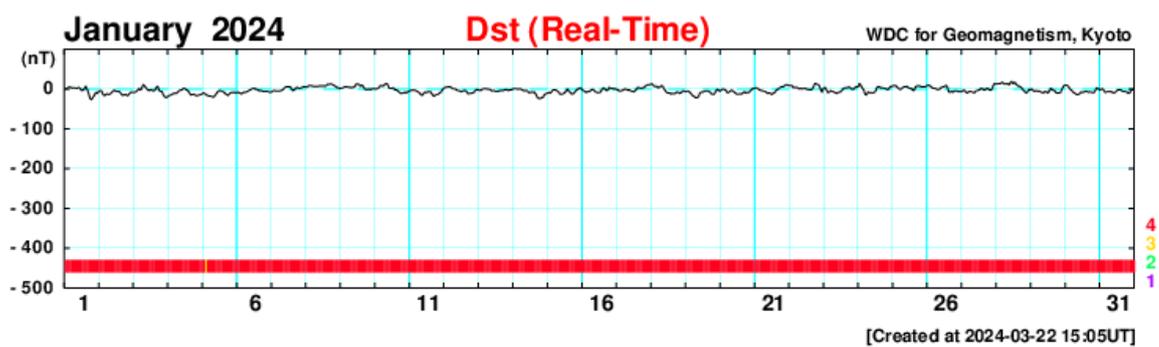


Рисунок 15 — График Dst-индекса

2. ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА АВИАЦИЮ

2.1 Влияние космической погоды на высокочастотную связь

Заряженные частицы могут увеличивать электронную плотность в ионосфере и, как следствие, вызвать поглощение радиоволн. Когда очень энергичные частицы попадают в атмосферу над полярными регионами, повышенная ионизация, возникающая на высотах 50-100 км ионосферы (D-область), особенно эффективна при поглощении ВЧ-радиосигналов и может сделать ВЧ-связь невозможной во всех полярных регионах. Поглощение, вызванное заряженными частицами, подразделяется на авроральное поглощение (AA) или поглощение полярной шапки (PSA). Авроральное поглощение часто бывает кратковременным, нерегулярным и ограничивается полосой геомагнитных широт около 60–75°, в то время как события PSA сильнее ощущаются в освещенной солнцем ионосфере, что приводит к дневным/ночным и сезонным циклам поглощения и может длиться несколько дней. Авроральное поглощение указывает на увеличение электронной плотности в ионосфере D-области, главным образом, за счёт электронов с энергией >30 кэВ, осаждающихся из магнитосферы. Она растёт и затухает вместе с авроральной и магнитной активностью и демонстрирует высокую пространственную и временную изменчивость [11].

На распространение высокочастотной связи негативно влияет, как правило, отсутствие доступа к верхнему концу ВЧ-диапазона на поздних стадиях ионосферных бурь. ВЧ-связь на большие расстояния обеспечивается за счёт отражения от ионосферы. Максимально применимая частота (MUF) для данного канала связи — это самая высокая частота КВ-связи, которая может использоваться для связи с помощью отраженного сигнала. Понижение MUF не позволяет воздушному судну использовать самые высокие частоты, которые обычно доступны. Мониторинг ионосферы для высокочастотной связи

осуществляется путем наблюдения за MUF на вертикальной траектории. Понижение MUF для данного времени суток определяется как процентное снижение MUF по сравнению с 30-дневной медианой MUF (для того же местного времени), с целью учёта суточных, сезонных и солнечных циклических вариаций в ионосферной поддержке ВЧ [3].

2.2 Влияние космической погоды на навигацию и наблюдение на основе GNSS

Один из крупнейших источников ошибок в сигналах позиционирования, навигации и времени (PNT) от спутников GNSS связан с прохождением спутникового сигнала через относительно плотную электронную среду верхних слоёв атмосферы. Эти ошибки компенсируются для приемников GPS, которые используют модель коррекции ионосферной задержки. Во время ионосферных бурь или периодов, когда ионосфера значительно отклоняется от нормальных условий, эти модели могут быть неадекватными и приводить к неисправленным ошибкам местоположения. Системы точной навигации с автоматической коррекцией для ионосферы, такие как системы дифференциальной коррекции GPS, система дифференциальной коррекции (SBAS) или наземная система функционального дополнения (GBAS), по-прежнему подвержены ошибкам во время сильных ионосферных бурь. Позиционирование GNSS также подвержено помехам от солнечных радиовсплесков в ультравысокочастотном (УВЧ) диапазоне, что в тяжелых случаях приводит к значительной потере слежения за спутниками на срок до десятков минут.

Ионосферная сцинтилляция — это быстрое колебание мощности и/или фазы радиосигналов, проходящих через ионосферу. Сцинтилляция возникает, когда радиочастотный сигнал с частотой до нескольких гигагерц (ГГц) проходит через область мелкомасштабных неоднородностей электронной плотности

ионосферы. Эффект можно сравнить с мерцанием звёзд, когда их свет проходит через земную атмосферу.

Сцинтилляция происходит преимущественно в экваториальной области Земли ($\pm 20^\circ$ широты) между сумерками и полночью. Это происходит из-за большого истощения электронной плотности, известного как экваториальные плазменные пузыри, в ионосфере над этими областями. Сцинтилляция может возникать и в регионах высоких широт [10].

Амплитудная сцинтилляция напрямую влияет на соотношение сигналов и шумов в приемнике GPS, а также на уровни шума при кодовых и фазовых измерениях. Амплитудная сцинтилляция может быть настолько сильной, что интенсивность принимаемого сигнала GPS от данного спутника падает ниже порога слежения приемника, что приводит к потере захвата этого спутника и, следовательно, к необходимости повторного получения сигнала или сигналов GPS. Это приводит к снижению точности навигационных решений, потере данных и сбоям в цикле.

Фазовая сцинтилляция, если она достаточно сильная, может привести к нарушению фазовой синхронизации в приемниках GPS. Фазовая сцинтилляция также оказывает значительное влияние на чувствительные к фазе системы, такие как радары космического базирования и некоторые наземные радиоастрономические средства.

Существует множество способов измерений ионосферных сцинтилляций. Пожалуй, наиболее распространенными из них являются индекс амплитудных сцинтилляций S_4 и индекс фазовых сцинтилляций P_{rms} .

S_4 представляет собой безразмерное число с теоретическим верхним пределом 1.0, обычно оцениваемым за интервал в 60 секунд. Существует два определённых режима амплитудных сцинтилляций: слабый и сильный, которые примерно соответствуют типу рассеяния, связанному с каждым из них. Обычно считается, что сильная сцинтилляция возникает при S_4 больше ~ 0.6 и связано с сильным рассеянием сигнала в ионосфере. Всё что ниже этого — слабая

сцинтилляция. Уровень S_4 ниже 0.3 вряд ли окажет существенное влияние на GPS.

Фазовая сцинтилляция количественно оценивается индексом P_{rms} (или σ_ϕ), который определяется как стандартное отклонение фазы сигнала за заданный интервал времени. Этот индекс измеряется либо в радианах, либо в градусах. Значение σ_ϕ больше $\sim 1^\circ$ считается сильной сцинтилляцией. В средних широтах значение σ_ϕ редко превышает 1° более чем в 1% случаев [9].

Полное содержание электронов (ПЭС) является одним из способов измерить ионосферные возмущения. Это изменчивость количества свободных электронов на пути прохождения сигнала GNSS. ПЭС варьируется по всему земному шару, самые высокие значения обычно находятся вблизи геомагнитного экватора. Значения варьируются в зависимости от сезона, времени солнечного цикла, и могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от количества солнечных вспышек. Высокое ПЭС приводит к увеличению погрешностей определения дальности и, следовательно, к ошибкам определения местоположения воздушного судна [3].

2.3 Влияние космической погоды на радиацию

Два основных источника ионизирующего излучения создают радиационную обстановку на авиационных высотах: фоновое галактическое космическое излучение (ГКЛ), состоящее из высокоэнергетических частиц, возникающих за пределами Солнечной системы, например, в результате взрывных сверхновых; и события SEP, связанные с кратковременными солнечными извержениями, которые могут значительно увеличить поток энергичных частиц, попадающих в атмосферу Земли на относительно короткие периоды времени (от часов до дней). Солнечные радиационные бури, состоящие из солнечных энергетических частиц (SEP), ускоренных во время вспышек и межпланетных ударов, вызванных корональными выбросами массы, являются одним из типов явлений, которые могут повлиять на эту окружающую среду.

SEP способны вызывать сбои в работе электронного оборудования космического базирования и нарушать высокочастотную радиосвязь в полярных регионах. Эти события могут представлять радиационную опасность для астронавтов, а также лётного экипажа и пассажиров [12].

Таблица 4 — Потоки протонов в околоземном пространстве

S	Интенсивность	Последствия на различные системы	Уровень потока частиц с энергией ≥ 10 МэВ	Средняя частота (1 цикл=1 лет)
S5	Экстремальная	<p>Биологические: неизбежная высокая радиационная опасность для космонавтов при выходе в открытый космос; пассажиры и экипаж, находящиеся в высоких широтах могут подвергаться высокому радиационному риску.</p> <p>Функционирование КА: потеря некоторых спутников; повреждение блоков памяти; зашумленность данных изображений; невозможность использования навигационных систем и систем ориентации на основе звёздных источников; возможно необратимое повреждение солнечных панелей.</p> <p>Другие системы: возможно полное отключение высокочастотной связи в полярных регионах; ошибки позиционирования чрезвычайно затрудняют навигационные операции.</p>	10^5 част/см ²	Менее 1 за цикл
S4	Очень сильная	<p>Биологические: высокая радиационная опасность для астронавтов, находящихся в открытом космосе; пассажиры и экипаж, находящиеся в высоких широтах могут подвергаться значительному радиационному риску.</p> <p>Функционирование КА: проблемы с блоками памяти; зашумленность данных изображений; проблемы с использованием систем ориентации; эффективность солнечных батарей может снизиться.</p>	10^4 част/см ²	3 за цикл

		Другие системы: нарушение ВЧ-связи в полярных регионах и увеличение навигационных ошибок в течение нескольких дней.		
S3	Сильная	Биологические: небольшая радиационная опасность для астронавтов, находящихся в открытом космосе; пассажиры и экипаж, находящиеся в высоких широтах могут подвергаться радиационному риску. Функционирование КА: вероятны единичные сбои; шумы в изображениях; небольшое снижение эффективности солнечных батарей. Другие системы: ухудшение распространения радиосигналов через полярные зоны; вероятны ошибки навигационного определения местоположения.	10^3 част/см ²	10 за цикл
S2	Умеренная	Биологические: нет. Функционирование КА: возможны редкие единичные сбои. Другие системы: единичные случаи ухудшения прохождения радиоволн на высоких частотах в полярной зоне и ошибок навигационных систем.	10^2 част/см ²	25 за цикл
S1	Слабая	Биологические: нет. Функционирование КА: нет. Другие системы: незначительное воздействие на ВЧ-связь в полярных регионах.	10 част/см ²	50 за цикл

Большинство солнечных вспышек испускают протоны с энергией до 10 МэВ. Однако только протоны с энергией, превышающей 300 МэВ, могут вызывать увеличение на высотах самолёта, и в среднем за один солнечный цикл происходило примерно три события с достаточной интенсивностью и энергией, чтобы вызвать значительное излучение в атмосфере. Во время SPE 1956 года было подсчитано, что доза облучения, полученная на высоте 40 000 футов (12 км) во время трансатлантического перелёта, составила бы приблизительно 10 мЗв.

Мониторинг воздействия природных источников ионизирующего излучения в настоящее время включен в рекомендации, предоставленные Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ). Она включает

в себя воздействие фонового космического излучения, полученного во время полета. В соответствии с действующими руководящими принципами МКРЗ, рекомендуемым пределом дозы для разных категорий граждан продемонстрирован в таблице 5.

Таблица 5 — Предельные дозы радиации

Категории	Эффективные дозы
Профессиональные	<p>Детерминированные: 150 мЗв — хрусталики глаз, 500 мЗв — 1 см² кожная поверхность, 500 мЗв — руки и ноги, к примеру, на рентгене.</p> <p>Стохастические: от 20 мЗв за год до 50 мЗв, но не более 100 мЗв за 5 лет, предельно допустимая за год 0,05 зВ.</p>
Общие	<p>Детерминированные: 150 мЗв — хрусталики глаз, 50 мЗв — 1 см² кожа.</p> <p>Стохастические: 0,7 – 2 мЗв/год,</p>
Беременные	1 мЗв на эмбрион/плод.

ГКЛ начинают взаимодействовать с атмосферой на высоте около 130 000 футов, вызывая выброс вторичных частиц в более плотную атмосферу внизу. Этот “поток частиц” и соответствующий уровень дозы излучения достигают максимальной интенсивности на высоте около 66 000 футов (~ 20 км), а затем медленно уменьшаются с высотой до уровня моря. Мощность дозы также увеличивается с увеличением широты, пока не достигнет примерно 50 градусов, после чего становится почти постоянной.

Нейтронные мониторы — это детекторы на поверхности Земли, которые измеряют галактические космические лучи. Данные детекторы регистрируют вторичные заряженные частицы. Когда более чем 3 станции измеряют увеличение радиации, мы определяем это как событие на уровне земли, что также подразумевает дополнительную дозу радиации на самолетах в полете. Также информация о потоке протонов с высокой энергией поступает со спутника GOES.

С ростом технического прогресса элементы авионики становятся меньше и компактнее, а значит, рост повреждений из-за космических лучей и вторичных энергичных частиц возрастает. Увеличение радиации может приводить электронные системы к сбоям команд. Слабые ошибки называют сбоями отдельного события (Single Event Upsets, SEU). Если одна частица может изменить более одного бита, то это приводит к множественным битовым сбоям (Multiple Bit Upsets, MBU). Эффекты единичного события (Single Event Effects, SEE) могут привести к неправильной работе электронного оборудования: (1) перевод устройства в состояние сильного потребления тока, вызывающее перегорание и отказ затронутого оборудования; (2) локальный пробой и разрыв диэлектрика, единичный пробой диэлектрика [13].

2.4 Обеспечение авиационных пользователей информацией о космической погоде

В интересах авионавигации для мониторинга и прогноза космической погоды нужно знать несколько параметров: индексы солнечной и геомагнитной активности, данные сети нейтронных мониторов, характеристики магнитного поля, поглощение в полярной шапке и в D-области ионосферы, ионограммы с мировой сети станций, данные со спутников о потоках частиц, рентгеновского излучения Солнца, характеристиках активных областей, КВМ [4].

Рекомендации ИКАО выдаются при любом из двух порогов интенсивности: умеренном (MOD) и сильном (SEV). Пороговые значения определены и воспроизведены в таблице ниже.

Таблица 6 — Пороговые значения для выпуска консультативных сообщений

Явление		Умеренное	Сильное
Связь (HF)	Уменьшение MUF	30%	50%
	Мощность рентгеновского излучения	10^{-4} нм (X1)	10^{-3} нм (X10)

	Авроральное поглощение	Кр = 8	Кр = 9
	Поглощение полярной шапки	2 дБ	5 дБ
Радиационное облучение	Мощность дозы	30 мкЗв/ч	80 мкЗв/ч
Навигация (GNSS)	Вертикальное ПЭС	125 ПЭС	175 ПЭС
	Фазовые сцинтилляции	0,4 рад	0,7 рад
	Амплитудные сцинтилляции	0,5	0,8

В консультативные сообщения включаются один или несколько следующих видов воздействия космической погоды: HF COM, GNSS, RADIATION. 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». Для наблюдаемой или прогнозируемой протяжённости воздействия возмущений космической погоды используются следующие сокращения, представленные в таблице 7.

Таблица 7 — Пространственный диапазон и сокращения

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

Ниже приведён пример консультативного сообщения, а также его расшифровка.

FNXX02 UUAG 220642
SWX ADVISORY
DTG: 20240222/0642Z
SWXC: CRC
ADVISORY NR: 2024/26
SWX EFFECT: HF COM MOD
OBS SWX: 22/0642Z DAYLIGHT SIDE
FCST SWX +6 HR: 22/1242Z NO SWX EXP
FCST SWX +12 HR: 22/1842Z NO SWX EXP
FCST SWX +18 HR: 23/0042Z NO SWX EXP
FCST SWX +24 HR: 23/0642Z NO SWX EXP
RMK: SWX EVENT (SOLAR FLARE) INPR IMPACTING LOWER HF
COM FREQ BAND ON THE DAYLIGHT SIDE
NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240222/1242Z=

Сообщение выпущено в 06:42 по UTC 22 февраля 2024 года глобальным консультативным центром CRC, при дежурстве российских специалистов. Номер сообщения — 26. Консультативное сообщение содержит информацию о умеренном воздействии на высокочастотную связь. Явление наблюдалось в 06:42 по UTC 22 числа на освещённой дневной стороне. По прогнозу дальнейших возмущений космической погоды не ожидается. В ремарке сказано, что событие космической погоды (продолжающаяся солнечная вспышка) оказывает воздействие на более низкую полосу частот ВЧ-связи на дневной стороне. Следующее сообщение будет выпущено 22 февраля 2024 года в 12:42 по UTC.

3. АНАЛИЗ КОНСУЛЬТАТИВНЫХ СООБЩЕНИЙ О ВЛИЯНИИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

3.1 Анализ консультативных сообщений на основе архива за ноябрь 2023 – май 2024 гг.

Синоптики узнают о возмущениях космической погоды с помощью консультативных сообщений. Почему они важны. Консультативные сообщения согласно приказу Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды от 14 ноября 2019 года «О предоставлении консультативных сообщений о космической погоде» 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 ноября 2023 – май 2024 гг.. Архив является маленьким, так как сообщения SWX не публикуют на веб-ресурсах более, чем на сутки. И узнать, что было до ноября 2023 не представляется возможным.

На рисунке 16 показано распределение опасных гелиогеофизических явлений на основе созданного архива. Чаще всего сообщения выпускались на сильное (37%) и умеренное (31%) ухудшение спутниковой навигации. Сообщения о умеренном ухудшении высокочастотной связи (25%). Реже всего выпускались сообщения на сильные ухудшения высокочастотной связи, что может быть связано с низкой солнечной активностью в двадцать пятый 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. Стоит отметить, что за данный период было выпущено

только три сообщения о повышенной радиационной опасности. Это связано с тем, что потоки ГКЛ и СКЛ не были столь интенсивны.

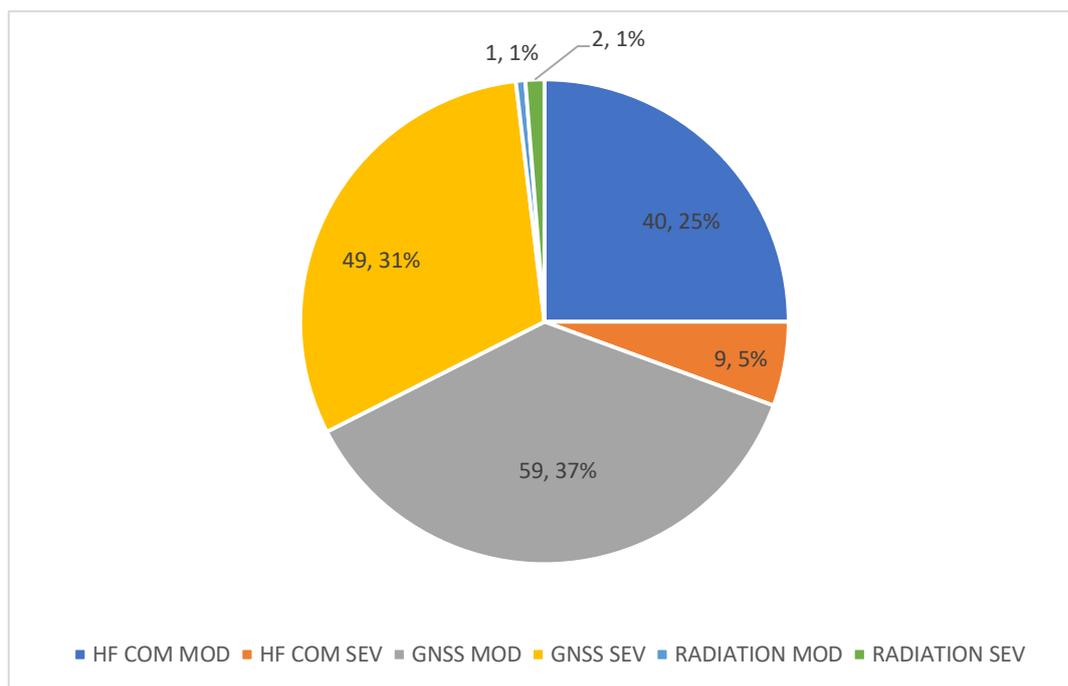


Рисунок 16 — Распределение описанных в консультативных сообщениях ОГЯ за период ноябрь 2023 – май 2024 гг.

Распределение описанных в консультативных сообщениях ОГЯ за период ноябрь 2023 – май 2024 года по зонам их возникновения представлено на рисунках 17 и 18. Частота выпуска сообщений SWX по северному и южному полушарию равны в процентном отношении. Не трудно заметить, что чаще всего консультативные сообщения выпускались по экваториальным широтам (60%), это связано с частотой выпуска об ухудшении спутниковой навигации. В 26% случаев были выпущены сообщения по высоким широтам, они уязвимы 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 дневной стороне (6%) и средним (8%) широтам — так как при высокой активности Солнца в виде солнечных вспышек и КВМ 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.

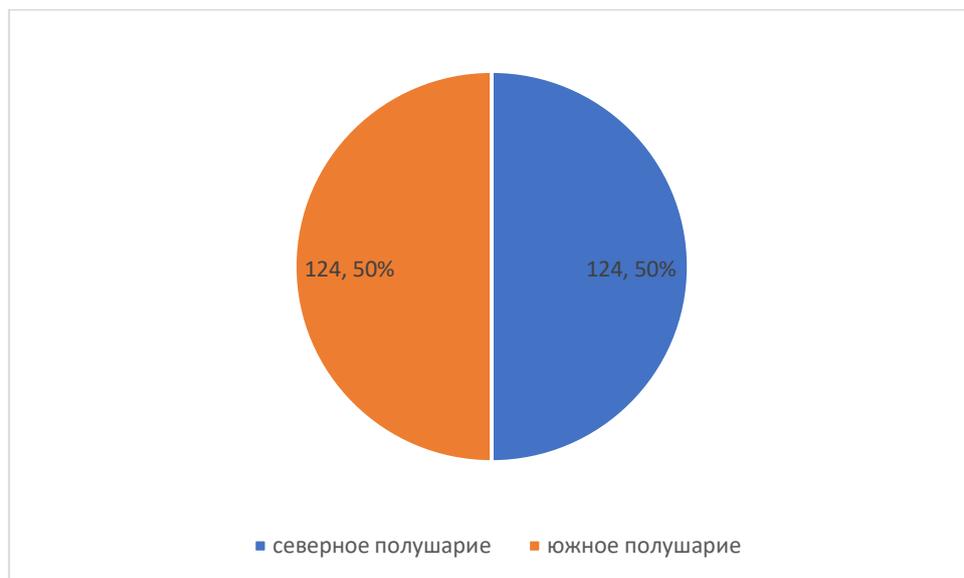


Рисунок 17 — Распределение ОГЯ по полушариям за период ноябрь 2023 – май 2024 гг.

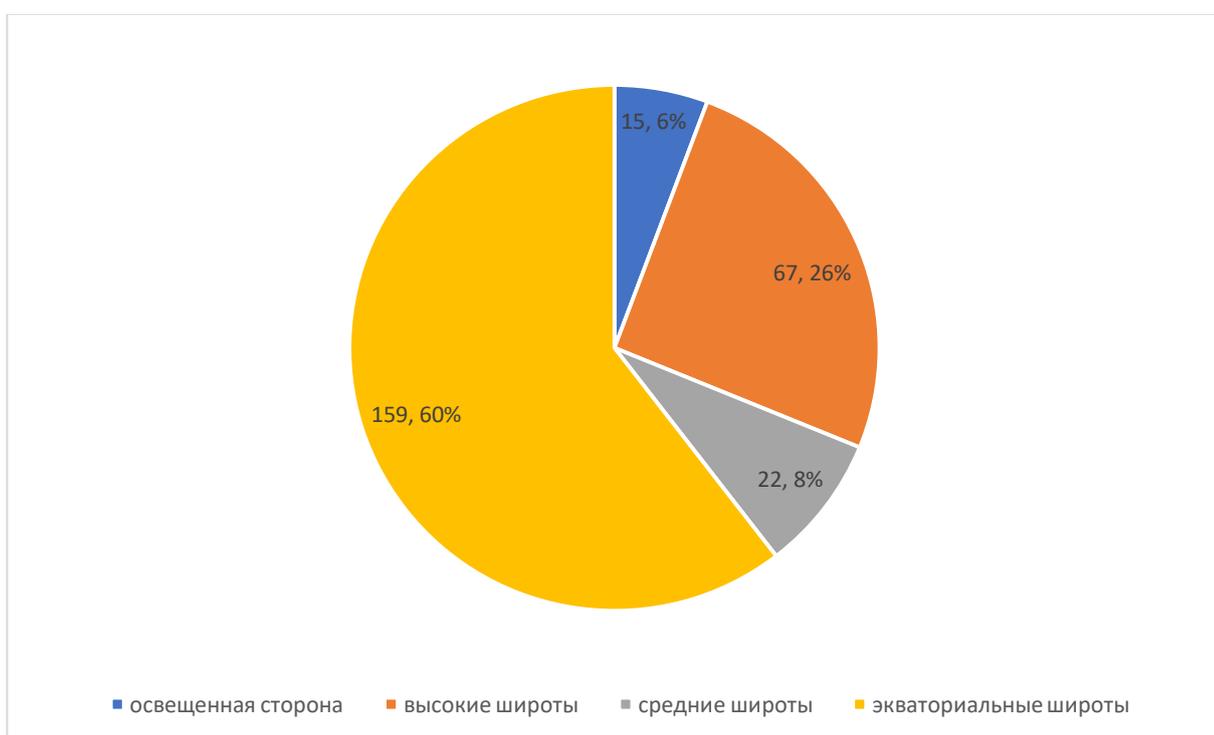


Рисунок 18 — Распределение ОГЯ по зонам возникновения за период ноябрь 2023 – май 2024 гг.

Рассмотрим несколько графиков, отображающих динамику солнечной активности. На рисунке 19 представлено количество солнечных пятен: среднемесячное и ежемесячное усредненное, а также прогноз на будущее до конца текущего солнечного цикла 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. Также можно отметить, что увеличился выпуск консультативных сообщений.



Рисунок 19 — Количество солнечных пятен в течение солнечного цикла

Для сравнения ниже приведен график последних солнечных циклов. Сравнивая общую тенденцию, не трудно убедиться, что двадцать пятый цикл прогрессирует и постепенно движется к своему максимуму, который прогнозируется на лето 2025 года. Также можно заметить, что столетний солнечный цикл, напротив, находится в относительном минимуме, что подтверждается меньшей солнечной активностью относительно предыдущих циклов.

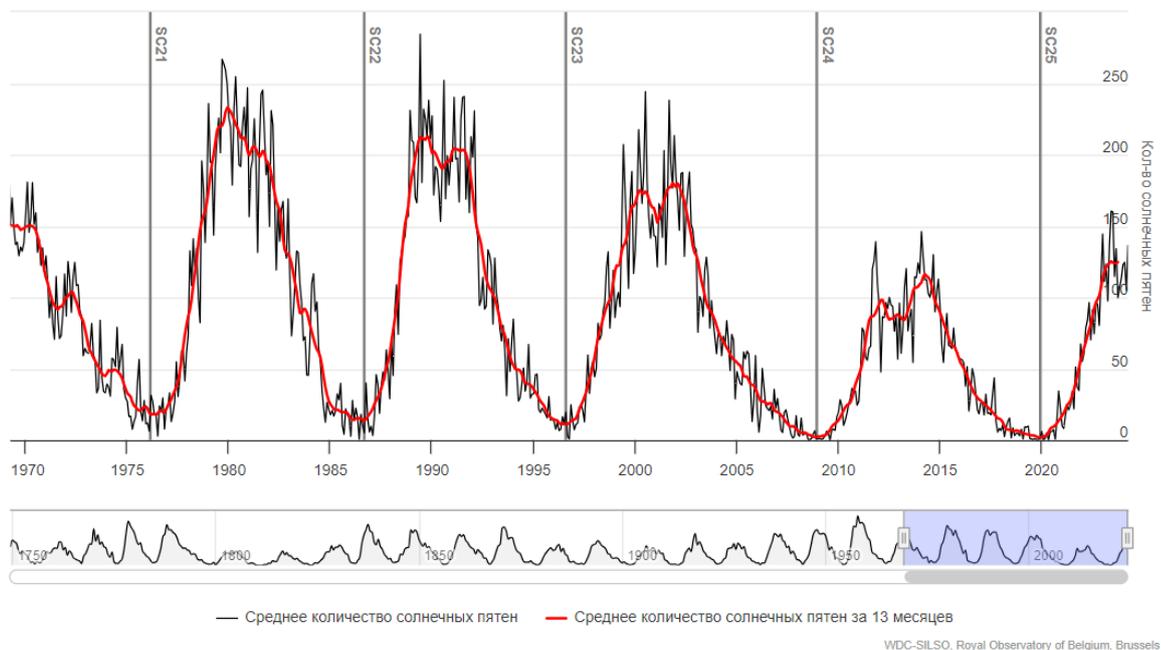


Рисунок 20 — Солнечные циклы

На следующем графике представлена мощность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см. Как упоминалось ранее она хорошо коррелирует с суммарной площадью солнечных пятен и уровнем ультрафиолетового излучения.

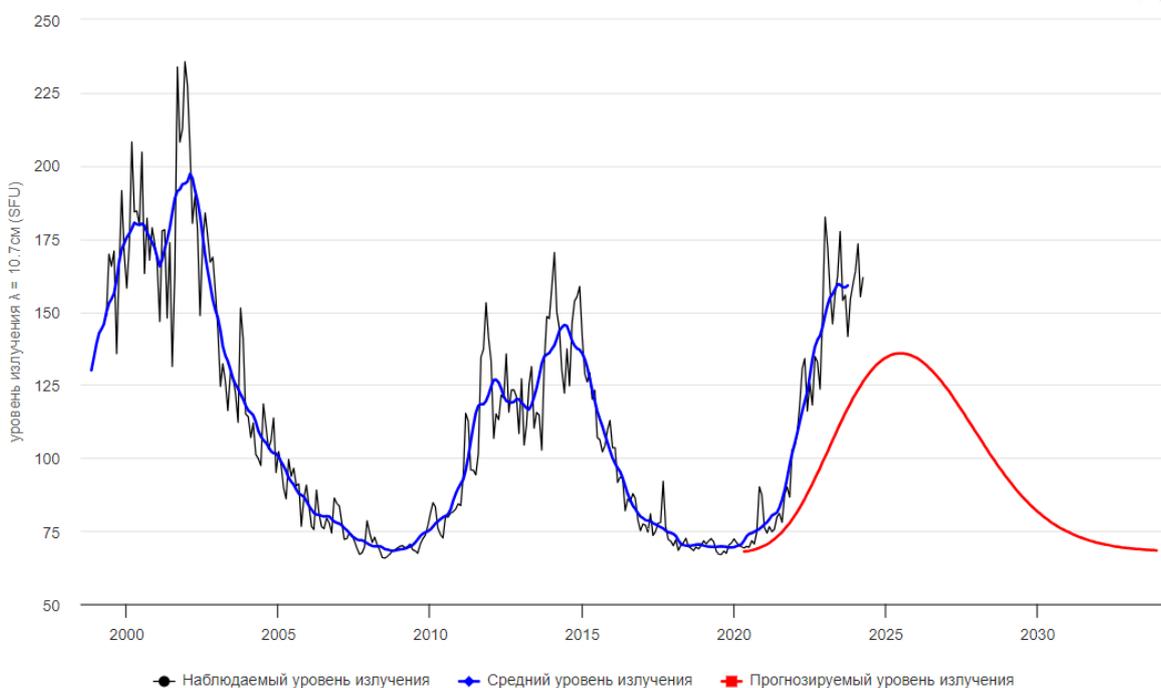


Рисунок 21 — Уровень излучения на длине волны 10.7 см в течение
солнечного цикла

Далее рассмотрим количество солнечных вспышек различной интенсивности в год. Стоит отметить, что по сравнению с 2020 годом, количество солнечных пятен увеличилось почти в 16 раз, однако вспышечная активность на данный момент сильнее проявлялась в 2023 году. Более того, в 2023 году было зафиксировано 2752 вспышки С-класса, 342 вспышки М-класса и 13 вспышек Х-класса. На 2024 год зафиксировано 1070 вспышки С-класса, 270 вспышки М-класса и 24 вспышек Х-класса.

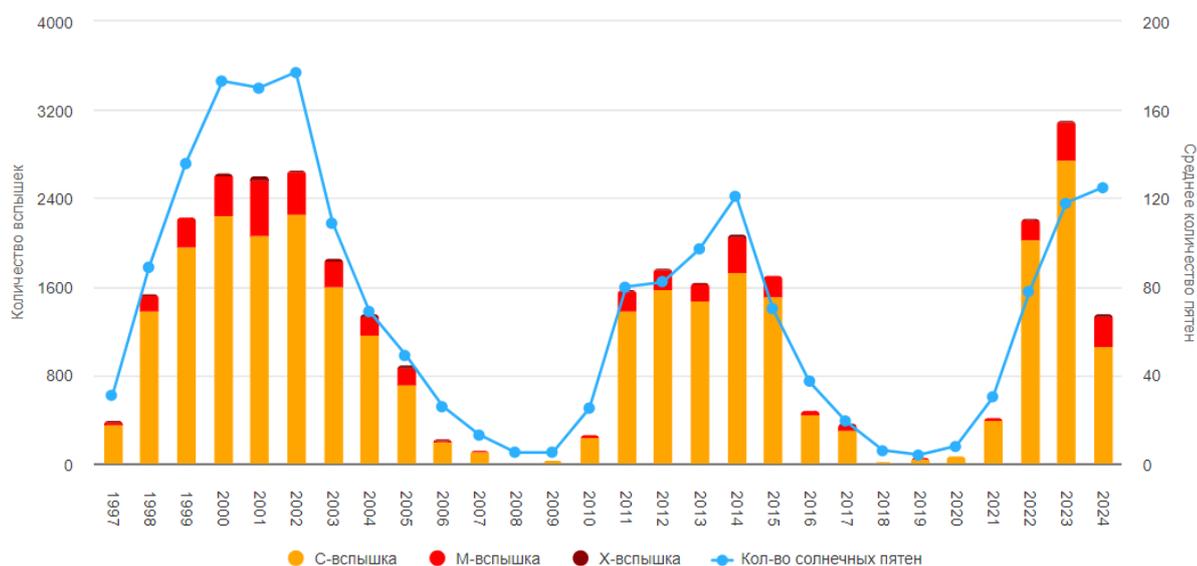


Рисунок 22 — Количество вспышек С-, М- и Х-класса

На рисунке 23 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 приближению солнечного цикла к своему максимуму. Геомагнитных бурь интенсивностью G4 было крайне мало, всего одна в 2021 году, ни одной в 2022, три в 2023 году и на момент 2024 года одна. 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.

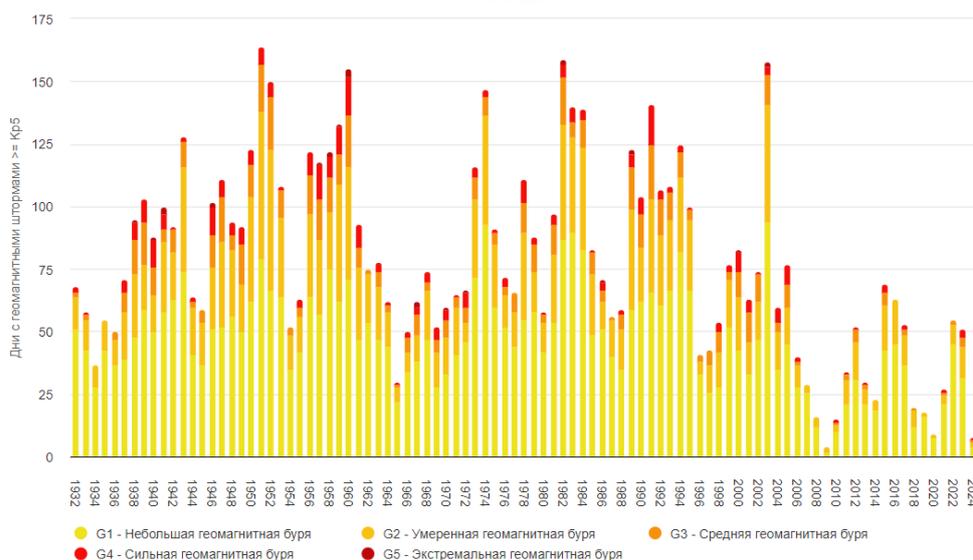


Рисунок 23 — Количество дней в году, когда наблюдались геомагнитные бури

3.2 Анализ влияния космической погоды на высокочастотную связь

Одна из самых известных магнитных бурь двадцать пятого солнечного цикла произошла 23 марта 2024 года и была связана с солнечной вспышкой класса X1.1, повлекшей за собой мощный выброс корональных масс.

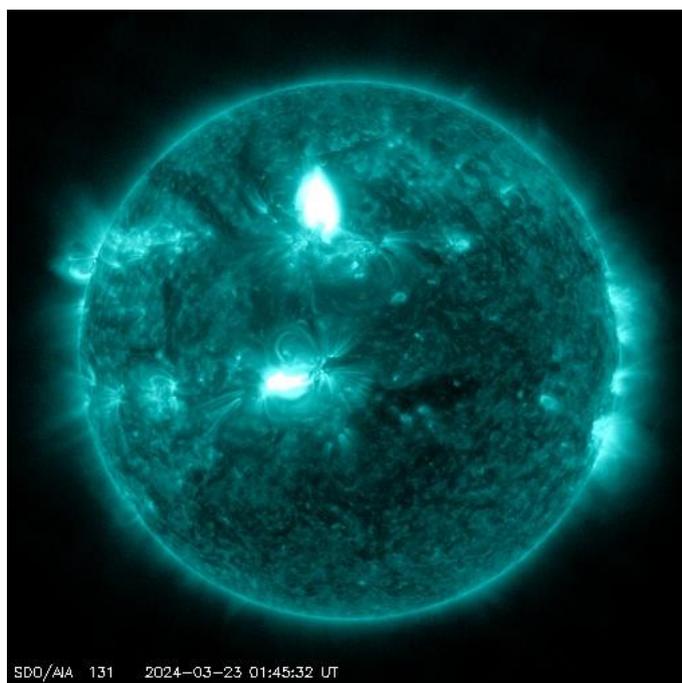


Рисунок 24 — Солнечная корона в длине волны 131 Ангстрем

На рисунке 25 можно увидеть фотосферу и активные области, интересующая нас область имеет координаты 17° с.ш. и 8° з.д.

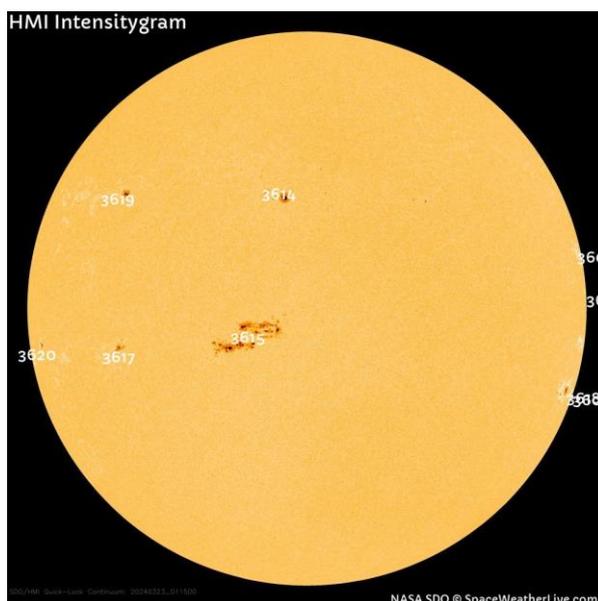


Рисунок 25 — Группы солнечных пятен

Вспышка балла X1.1 началась 23 марта в 00:58 и произошла в активной области 3614, её максимум пришёлся в 01:33, а закончилась 01:52 по UTC.

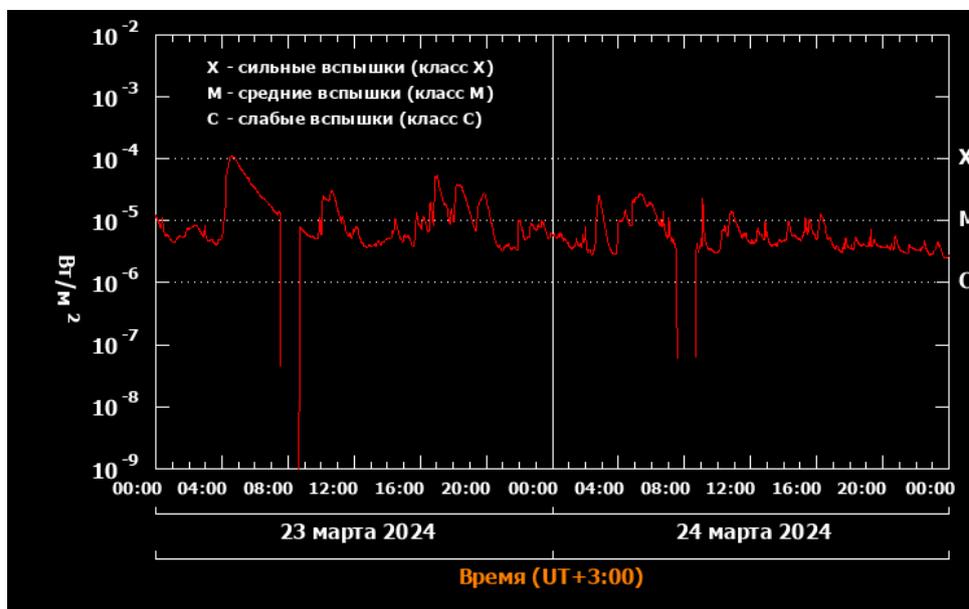


Рисунок 26 — Рентгеновское излучение Солнца по данным спутника GOES-16

Высокоскоростной поток, связанный с солнечным ветром, вызвал резкий спад плотности и интенсивности галактических космических лучей, согласно данным нейтронных мониторов.

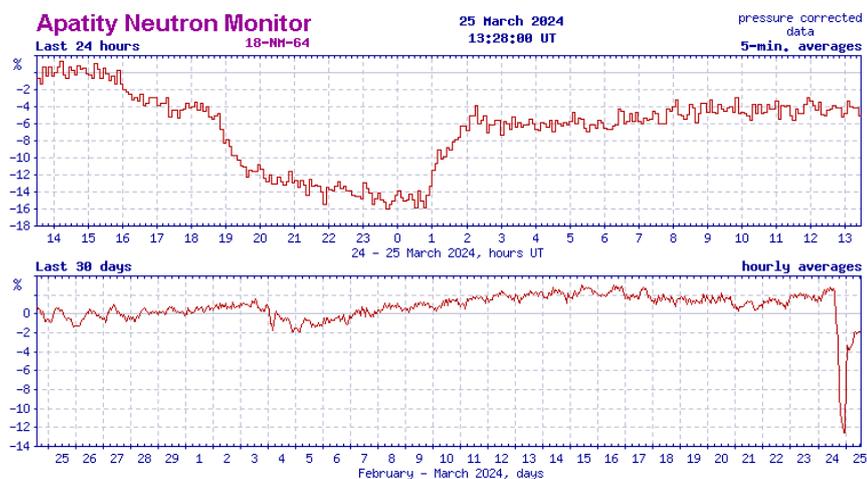


Рисунок 27 — Поток ГКЛ по данным нейтронного монитора в Апатитах

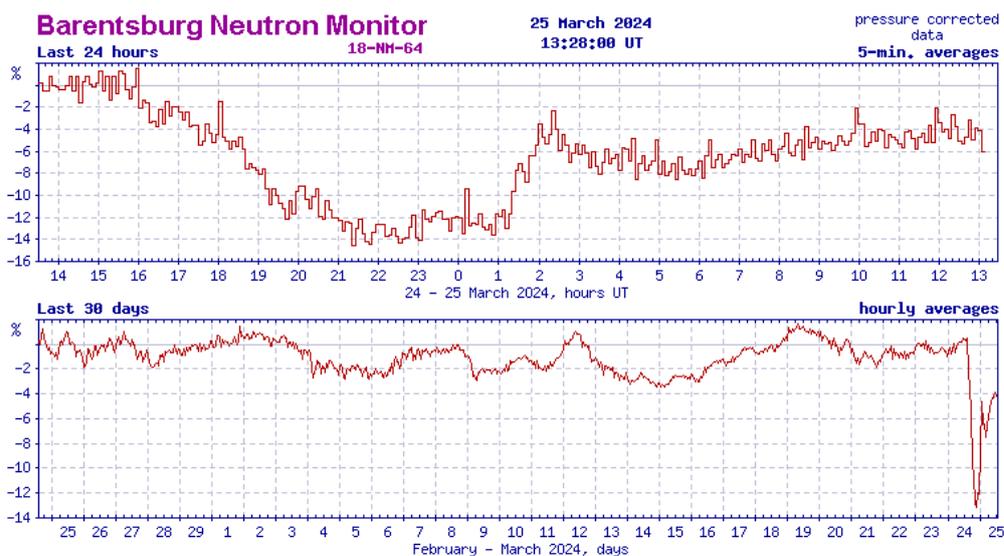


Рисунок 28 — Поток ГКЛ по данным нейтронного монитора в Баренцбурге

Кр-индекс достиг значения 8 24 марта в промежутке времени с 15:00 до 18:00 по UTC, что соответствует интенсивности очень сильной геомагнитной бури G4.

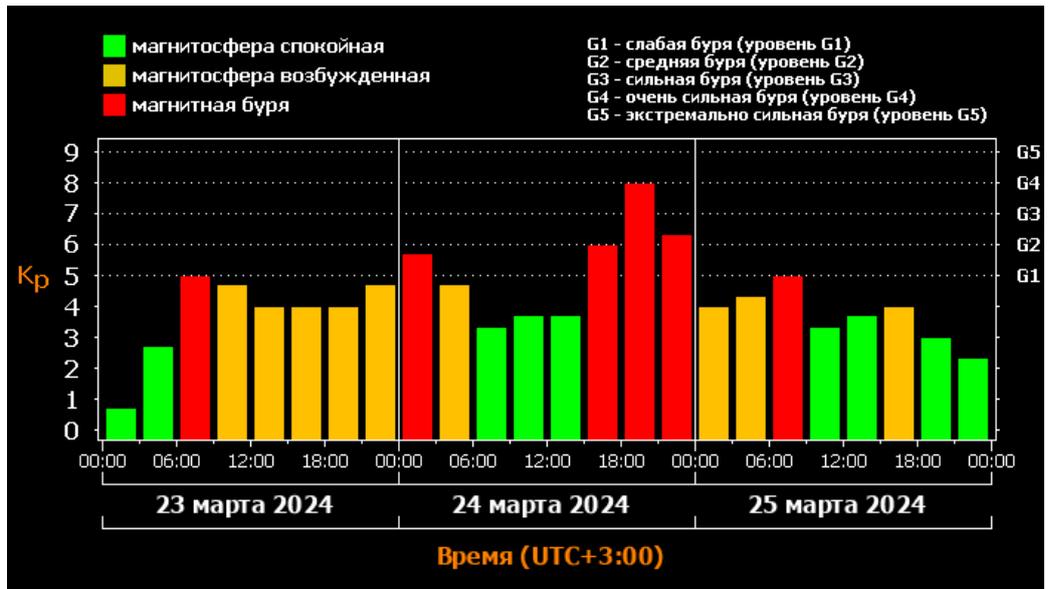


Рисунок 29 — Геомагнитные бури с 23 по 25 марта 2024 года

По данным спутника ACE происходило постепенное увеличение скорости солнечного ветра, температуры и плотности плазмы. В пике скорость солнечного ветра составила 800 км/с. Температура плазменного облака, окружившее Землю, увеличилась до 1 млн градуса Кельвин.

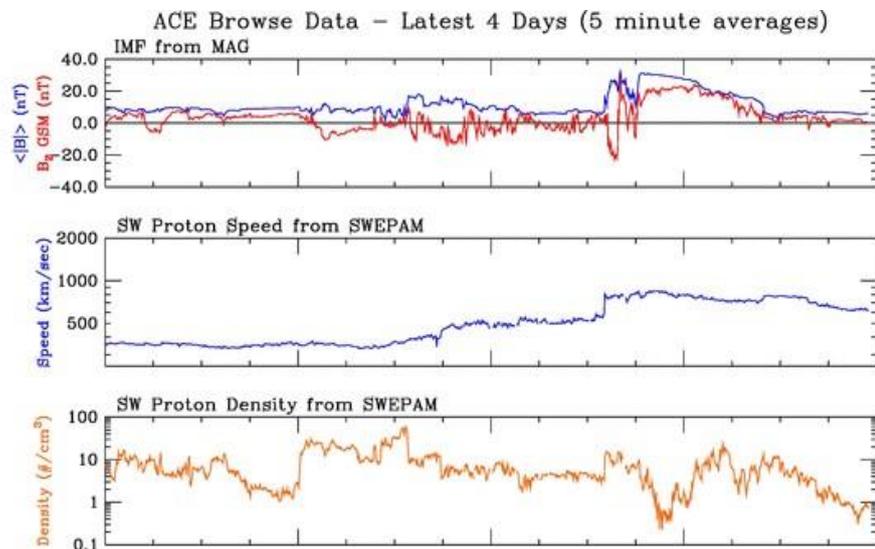


Рисунок 30 — Данные спутника ACE с 22 по 25 марта 2024 года

В результате крупного коронального выброса и солнечного ветра прогноз смещения аврорального кольца достиг почти 50 параллели северной широты.

Так северное сияние можно было наблюдать выше красной линии, показанной на рисунке 31. Красная область являлась наиболее возмущенной в магнитосфере.

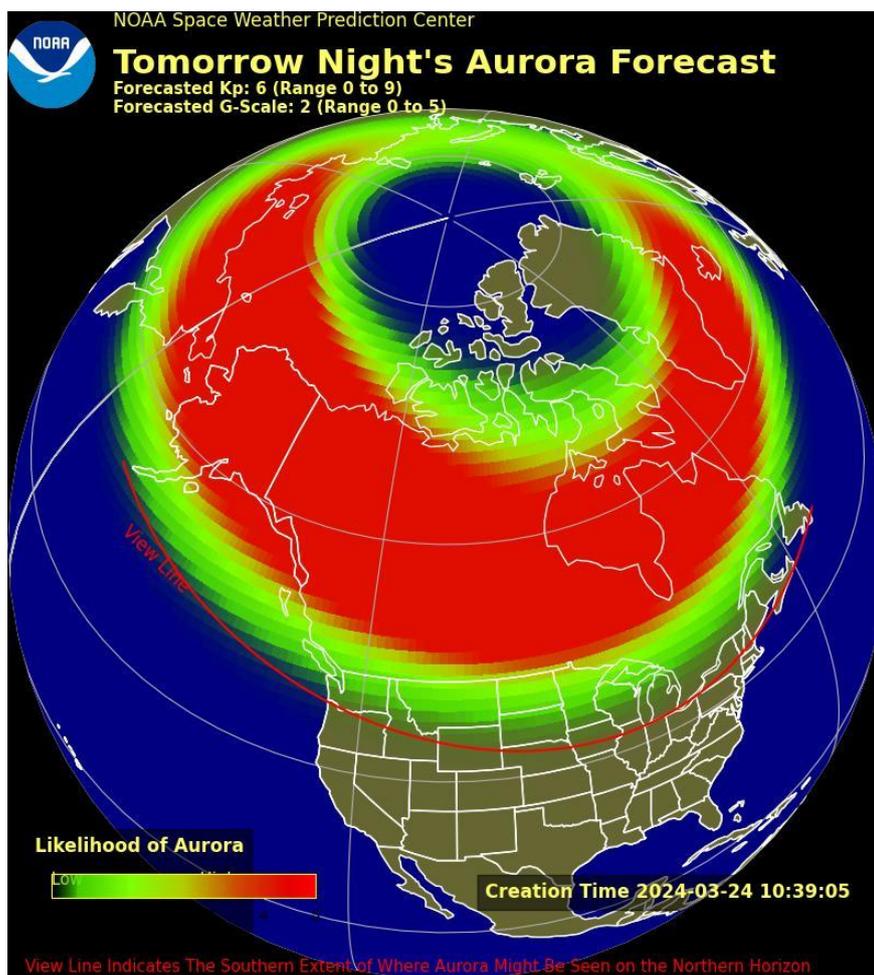


Рисунок 31 — Прогноз полярного сияния в ночь с 24 по 25 марта 2024 года

В результате солнечной вспышки над северным и южным полушариями произошло значительное нарушение высокочастотной связи. Теперь рассмотрим консультативные сообщения, которые были выпущены на высокочастотную связь. Всего за период 23 по 24 марта их было выпущено 15. На рисунке 32 представлены первые 6 сообщений. Они были выпущены глобальным центром космической погоды PECASUS под дежурством финских синоптиков. Сообщения были выпущены на умеренное и сильное воздействие на ВЧ-связь.

По рекомендации ИКАО выпускать консультативные сообщения нужно каждые 6 часов, но в данном случае они выпускались чаще, чтобы

скорректировать зону влияния и воздействие. Для лучшего понимания процессов были даны RMK в которых сказано, что происходит событие космической погоды (поглощение полярной шапки), которое оказывает воздействие на более низкую полосу частот КВ-связи в высоких широтах.

<p>FNXX02 EFLK 231319 SWX ADVISORY DTG: 20240323/1319Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/33 SWX EFFECT: HF COM MOD OBS SWX: 23/1312Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +6 HR: 23/2000Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +12 HR: 24/0200Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +18 HR: 24/0800Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 24/1400Z NOT AVBL RMK: SPACE WEATHER EVENT (HF COM POLAR CAP ABSORPTION) IN PROGRESS. IMPACT ON LOWER HF COM FREQUENCY BANDS EXPECTED AT HIGH LATITUDES. NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240323/1912Z=</p>	<p>FNXX02 EFLK 231519 SWX ADVISORY DTG: 20240323/1519Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/34 NR RPLC: 2024/33 SWX EFFECT: HF COM SEV OBS SWX: 23/1512Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +6 HR: 23/2200Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +12 HR: 24/0400Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +18 HR: 24/1000Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +24 HR: 24/1600Z HNH HSH W180 - E180 RMK: SPACE WEATHER EVENT (HF COM POLAR CAP ABSORPTION) IN PROGRESS. IMPACT ON LOWER HF COM FREQUENCY BANDS EXPECTED AT HIGH LATITUDES. NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240323/2112Z=</p>	<p>FNXX02 EFLK 232109 SWX ADVISORY DTG: 20240323/2110Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/35 NR RPLC: 2024/34 SWX EFFECT: HF COM SEV OBS SWX: 23/2100Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +6 HR: 24/0300Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +12 HR: 24/0900Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +18 HR: 24/1500Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +24 HR: 24/2100Z HNH HSH W180 - E180 RMK: SPACE WEATHER EVENT (HF COM POLAR CAP ABSORPTION) IN PROGRESS. IMPACT ON LOWER HF COM FREQUENCY BANDS EXPECTED AT HIGH LATITUDES. NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240324/0305Z=</p>
<p>FNXX02 EFLK 240041 SWX ADVISORY DTG: 20240324/0042Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/36 SWX EFFECT: HF COM MOD OBS SWX: 24/0029Z HNH MNH EQN EQS W045 - W150 FCST SWX +6 HR: 24/0700Z NOT AVBL FCST SWX +12 HR: 24/1300Z NOT AVBL FCST SWX +18 HR: 24/1900Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 25/0100Z NOT AVBL RMK: SPACE WEATHER EVENT (MAXIMUM USABLE FREQUENCY DEPRESSION) IS IN PROGRESS. IMPACT ON HIGHER HF COM FREQUENCY BANDS EXPECTED. NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240324/0629Z=</p>	<p>FNXX02 EFLK 240305 SWX ADVISORY DTG: 20240324/0306Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/37 NR RPLC: 2024/35 SWX EFFECT: HF COM SEV OBS SWX: 24/0300Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +6 HR: 24/0900Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +12 HR: 24/1500Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +18 HR: 24/2100Z HNH HSH W180 - E180 FCST SWX +24 HR: 25/0300Z NOT AVBL RMK: SPACE WEATHER EVENT (HF COM POLAR CAP ABSORPTION) IN PROGRESS. IMPACT ON LOWER HF COM FREQUENCY BANDS EXPECTED AT HIGH LATITUDES. NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240324/0900Z=</p>	<p>FNXX02 EFLK 240512 SWX ADVISORY DTG: 20240324/0513Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/38 NR RPLC: 2024/36 SWX EFFECT: HF COM MOD OBS SWX: 24/0508Z EQS MSH E135 - E180 FCST SWX +6 HR: 24/1200Z NOT AVBL FCST SWX +12 HR: 24/1800Z NOT AVBL FCST SWX +18 HR: 25/0000Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 25/0600Z NOT AVBL RMK: SPACE WEATHER EVENT (MAXIMUM USABLE FREQUENCY DEPRESSION) IS IN PROGRESS. IMPACT ON HIGHER HF COM FREQUENCY BANDS EXPECTED. NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240324/1108Z=</p>

Рисунок 32 — Консультативные сообщения, выпущенные на ВЧ-связь

На рисунке 33 можно проследить как менялась зона воздействия события космической погоды.

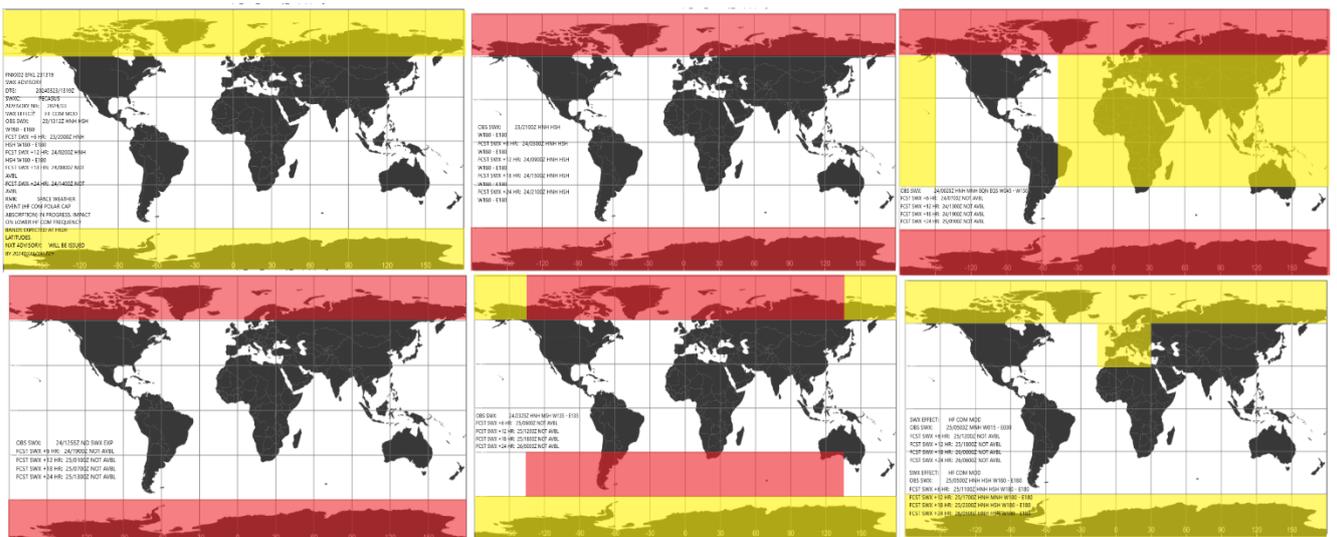


Рисунок 33 — Зоны распространения ОГЯ

Связь и навигация составляют ключевые функции в современной организации воздушного движения и являются краеугольными камнями, обеспечивающими безопасность и эффективность воздушного движения. И как упоминалось во второй главе повышенная ионизация эффективна при поглощении ВЧ-радиосигналов и связь будет ухудшаться или прерываться на полюсах.

Чтобы оценить влияние события космической погоды мы должны применить рекомендуемые ИКАО пороговые значения для выпуска консультативных сообщений. Таковыми являются авроральное поглощение максимально применимая частота (MUF), поглощение полярной шапки и рентгеновское излучение. Выше уже упоминались два явления: авроральное поглощение, чей индекс Kp равняется 8, а также уровень рентгеновского излучения, который достиг 10^{-4} Вт/м².

Согласно документу ИКАО “Руководство по информации о космической погоде для обеспечения международной авронавигации” максимально применимую частоту нужно брать по сравнению с 30-дневной медианой. Используя модель STIRe (модель электродинамики термосферы ионосферы и плазмосферы) можно увидеть, что MUF снизилась на 50 %. На рисунке 34 продемонстрировано изменение MUF на временные промежутки, когда были выданы консультативные сообщения.

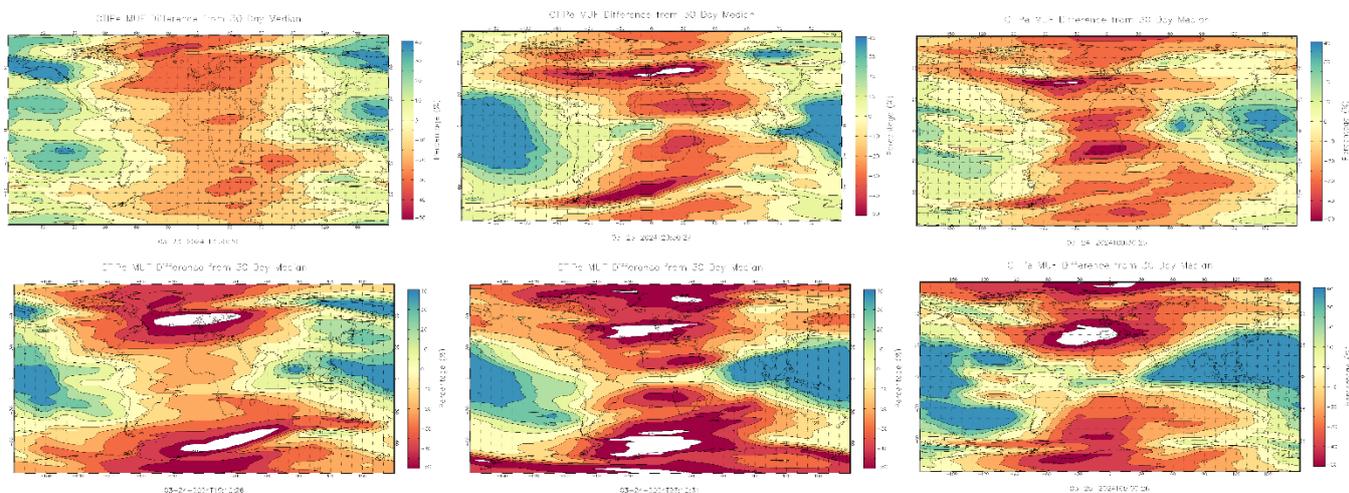


Рисунок 34 — Модель изменения MUF

На рисунке ниже представлены данные модели D-RAP (прогноз поглощения области D). Продукт описывает такое явление как ППШ. Данная модель демонстрирует степень поглощения волн ионосферой, а именно описывает D-область, которая измеряется в децибелах.

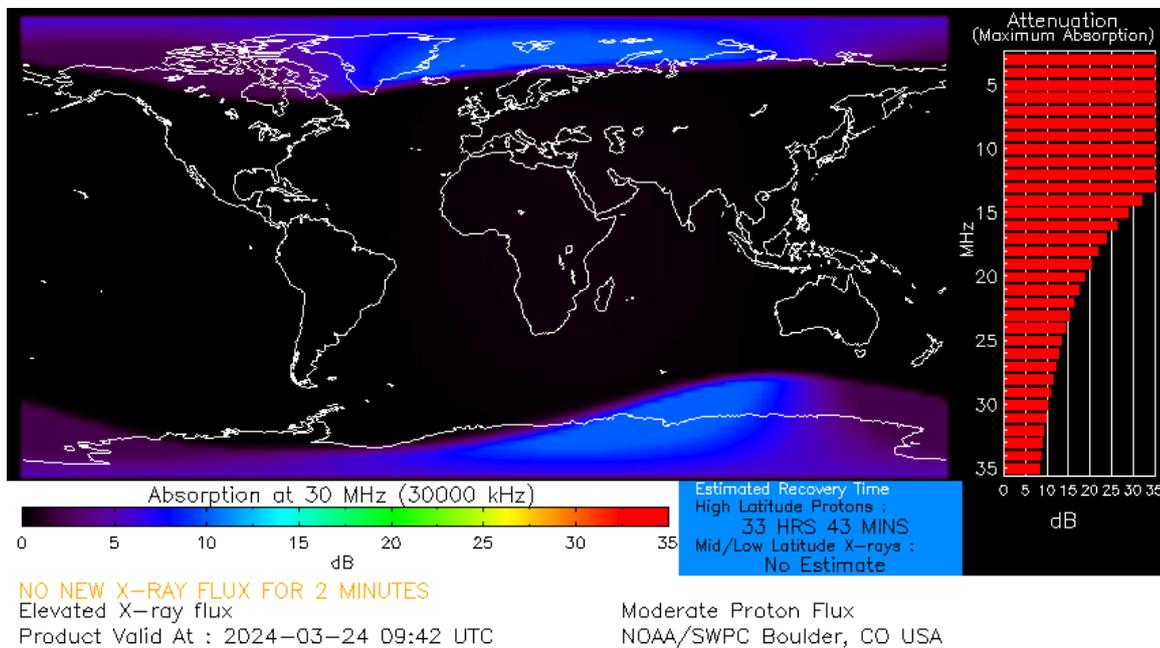


Рисунок 35 — Глобальная карта поглощения ионосферой

Данные модели предоставляет сайт NOAA SWPC, они также предоставляют отдельные карты по каждому из полюсов.

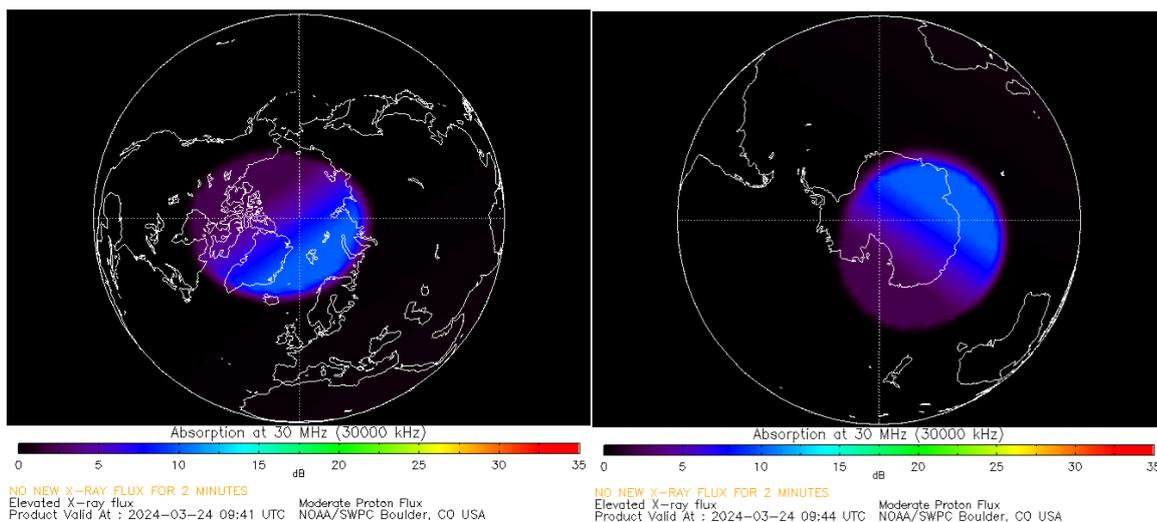


Рисунок 36 — Карта поглощения ионосферой для северного (слева) и южного (справа) полюсов

По полученным данным можно увидеть, что солнечная вспышка привела, во-первых, к поглощению радиоволн на всей освещенной стороне Земли. Рентгеновское событие достигло пика 23 марта в 01:37 по UTC о чем было выпущено консультативное сообщение. Чтобы вернуться к нормальным фоновым условиям потребовался один час. Через сутки пришел КВМ, который смог привести к ухудшению и поглощению связи на частотах выше 35 МГц в основном на полюсах в период с 23 по 25 марта 2024 года.

3.3 Анализ влияния космической погоды на навигацию и наблюдение на основе GNSS

Ионосфера также играет решающую роль в спутниковой навигации. Сигнал, отправленный спутником, должен пройти через ионосферу, чтобы достичь приемника. Солнечные бури могут создавать мелкомасштабные структуры в ионосфере. Когда сигнал сталкивается с этими препятствиями, его амплитуда и фаза могут очень быстро измениться. Аналогичным образом, когда количество электронов в ионосфере резко увеличивается из-за солнечной бури, в спутниковой навигации возникают ошибки позиционирования.

Рассмотрим консультативные сообщения, которые выдавались на период с 23 по 24 марта. Всего за этот период их было выпущено 8. Для удобства потребителям была дана ремарка в которой написано, что происходит явление космической погоды (ионосферное возмущение). Воздействие на производительность GNSS может привести к потере сигналов и/или ухудшению характеристик синхронизации и позиционирования.

FNXX01 EFKL 232120
 EFKL 232120
 SWX ADVISORY
 DTG: 20240323/2121Z
 SWXC: PECASUS
 ADVISORY NR: 2024/162
 NR RPLC: 2024/161
 SWX EFFECT: GNSS SEV
 OBS SWX: 23/2114Z EQN W030 - E000
 FCST SWX +6 HR: 24/0400Z NOT AVBL
 FCST SWX +12 HR: 24/1000Z NOT AVBL
 FCST SWX +18 HR: 24/1600Z NOT AVBL
 FCST SWX +24 HR: 24/2200Z 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 20240324/0314Z=

FNXX01 EFLK 232334
 SWX ADVISORY
 DTG: 20240323/2335Z
 SWXC: PECASUS
 ADVISORY NR: 2024/163
 SWX EFFECT: GNSS MOD
 OBS SWX: 23/2317Z EQN W165 - W120
 FCST SWX +6 HR: 24/0600Z NOT AVBL
 FCST SWX +12 HR: 24/1200Z NOT AVBL
 FCST SWX +18 HR: 24/1800Z NOT AVBL
 FCST SWX +24 HR: 25/0000Z 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 20240324/0517Z=

FNXX01 EFKL 241408
 SWX ADVISORY
 DTG: 20240324/1408Z
 SWXC: PECASUS
 ADVISORY NR: 2024/166
 SWX EFFECT: GNSS MOD
 OBS SWX: 24/1358Z EQN EQS W050 - E070
 FCST SWX +6 HR: 24/2000Z NOT AVBL
 FCST SWX +12 HR: 25/0200Z NOT AVBL
 FCST SWX +18 HR: 25/0800Z NOT AVBL
 FCST SWX +24 HR: 25/1400Z 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 20240324/1958Z=

FNXX01 EFLK 242019
 SWX ADVISORY
 DTG: 20240324/2020Z
 SWXC: PECASUS
 ADVISORY NR: 2024/167
 NR RPLC: 2024/166
 SWX EFFECT: GNSS MOD
 OBS SWX: 24/2014Z EQN EQS W135 - E000
 FCST SWX +6 HR: 25/0300Z NOT AVBL
 FCST SWX +12 HR: 25/0900Z NOT AVBL
 FCST SWX +18 HR: 25/1500Z NOT AVBL
 FCST SWX +24 HR: 25/2100Z 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 20240325/0214Z=

Рисунок 37 — Консультативные сообщения, выпущенное на спутниковую навигацию

На рисунке 38 показана зона, на которую воздействует событие космической погоды. Как видно оно распространилось на экваториальные широты и с течением времени зона воздействия перемещается на запад.

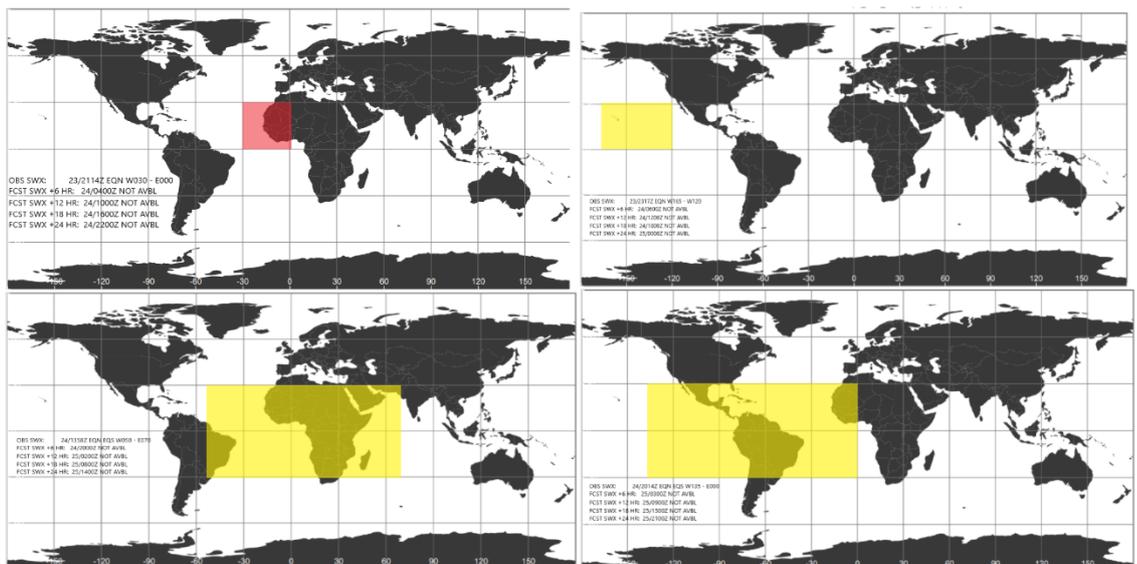


Рисунок 38 — Перемещение ОГЯ

Чтобы оценить амплитудную и фазовую изменчивость были выбраны данные, предоставляемые Метеорологическим Бюро Австралии (Bureau of Meteorology — BOM). Несмотря на то, что территория Австралии не входила в зону, описываемую в консультативных сообщениях это единственная страна, которая предоставляет показатели сцинтилляционной изменчивости в свободном доступе и сразу в графическом виде. Данные брались по трем городам за 23 и 24 число: Дарвин, Маккуори и Ниуэ.



Рисунок 39 — Амплитудные сцинтилляции за 23 (слева) и 24 марта (справа)

Так как уровень S_4 ниже 0.3 она не оказывает существенного влияния на GPS, но по данным с аппаратуры для регистрации сцинтилляций острова Маккуори наблюдались повышенные значения в период с 10:00 до 12:00 по UTC.



Рисунок 40 — Фазовые сцинтилляции за 23 (слева) и 24 марта (справа)

В отличие от амплитудных сцинтилляций σ_f имеет высокие показатели и скорее всего в районе Австралии имело место нарушение фазовой синхронизации в приемниках GPS.

Теперь рассмотрим полное содержание электронов. На рисунке 41 красным цветом показана область повышенных значений ПЭС, что в целом совпадает с зоной, указанной в консультативных сообщениях.

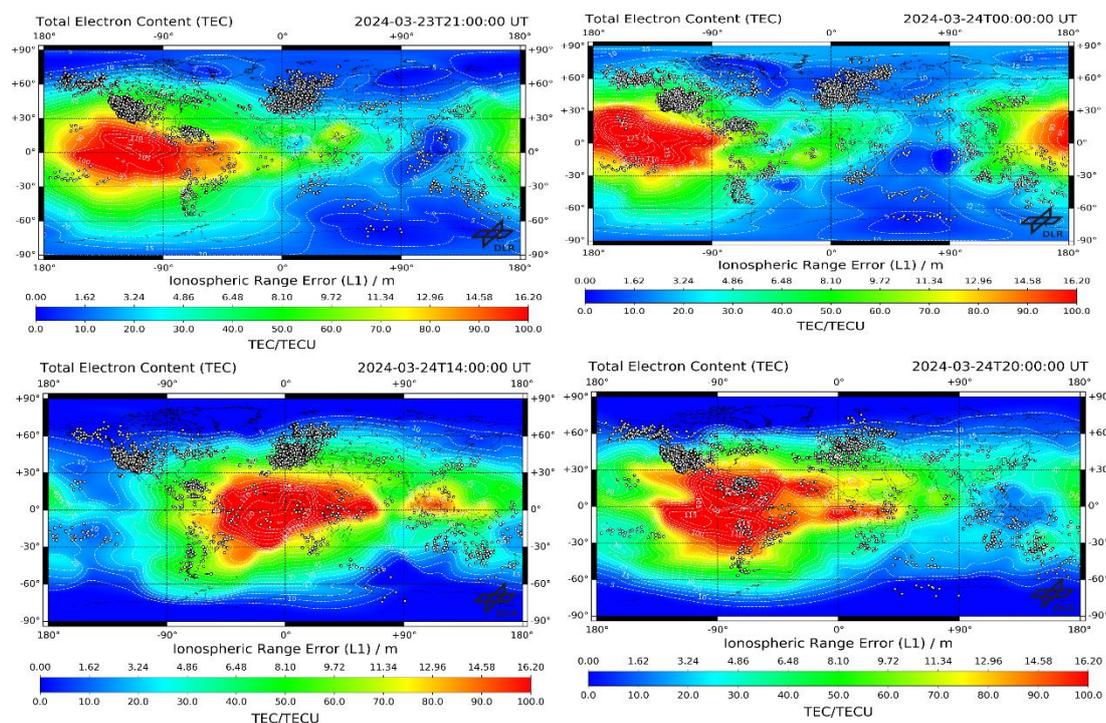


Рисунок 41 — Полное содержание электронов

Ионосфера в результате солнечной вспышки из-за высокого содержания электронов создавала препятствия для прохождения спутниковых сигналов. Это приводило к нарушению фазовой синхронизации в приемниках GPS, а также приводило к потере захвата этого спутника. В свою очередь ионосферная сцинтилляция помешала приемникам фиксировать сигнал и, как следствие, сделать невозможным вычисление его положения.

3.4 Анализ влияния космической погоды на радиацию

Во время солнечных извержений большое количество энергетических частиц может вылететь из Солнца и отправиться на Землю. Частицы перемещаются вдоль силовых линий магнитного поля Земли, сталкиваются с молекулами воздуха и создают в атмосфере ливни вторичных частиц. Эти частицы в конечном итоге задерживаются относительно плотной нижней атмосферой Земли. В экваториальных и средних широтах околоразомное магнитное поле Земли действует как щит. Однако в полярных регионах, где

магнитное поле ближе к вертикальному, энергичные частицы могут скатываться на более низкие высоты или даже достигать земли, увеличивая радиационное воздействие на людей, находящихся поблизости. Поскольку эти частицы ослабляются (замедляются и поглощаются) при прохождении через атмосферу, на больших высотах они подвергаются более высокому уровню радиации.

События 23 и 24 марта интересны тем, что первый раз, когда были выданы консультативные сообщения на радиацию в не тестовом формате. Рассмотрим 6 сообщений чуть подробнее.

<p>FNXX03 EFLK 241950 SWX ADVISORY DTG: 20240324/1951Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/2 SWX EFFECT: RADIATION SEV OBS SWX: 24/1925Z HNH MNH MSH HSH W180 - E180 ABV FL580 FCST SWX +6 HR: 25/0200Z NOT AVBL FCST SWX +12 HR: 25/0800Z NOT AVBL FCST SWX +18 HR: 25/1400Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 25/2000Z NOT AVBL RMK: SPACE WEATHER EVENT IN PROGRESS CAUSING INCREASED RADIATION LEVELS AT FLIGHT ALTITUDE(S). NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240325/0125Z=</p>	<p>FNXX03 EFLK 241958 SWX ADVISORY DTG: 20240324/1959Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/3 SWX EFFECT: RADIATION MOD OBS SWX: 24/1954Z HNH HSH MNH MSH W180 - E180 ABV FL460 FCST SWX +6 HR: 25/0200Z NOT AVBL FCST SWX +12 HR: 25/0800Z NOT AVBL FCST SWX +18 HR: 25/1400Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 25/2000Z NOT AVBL RMK: SPACE WEATHER EVENT IN PROGRESS CAUSING INCREASED RADIATION LEVELS AT FLIGHT ALTITUDE(S). NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240325/0154Z=</p>	<p>FNXX03 EFLK 242054 SWX ADVISORY DTG: 20240324/2055Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/4 NR RPLC: 2024/3 SWX EFFECT: RADIATION SEV OBS SWX: 24/2038Z HNH HSH MNH MSH W180 - E180 ABV FL460 FCST SWX +6 HR: 25/0300Z NOT AVBL FCST SWX +12 HR: 25/0900Z NOT AVBL FCST SWX +18 HR: 25/1500Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 25/2100Z NOT AVBL RMK: SPACE WEATHER EVENT IN PROGRESS CAUSING INCREASED RADIATION LEVELS AT FLIGHT ALTITUDE(S). NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240325/0238Z=</p>
<p>FNXX03 EFLK 242111 SWX ADVISORY DTG: 20240324/2112Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/5 NR RPLC: 2024/2 SWX EFFECT: RADIATION SEV OBS SWX: 24/2106Z NOT AVBL FCST SWX +6 HR: 25/0400Z NOT AVBL FCST SWX +12 HR: 25/1000Z NOT AVBL FCST SWX +18 HR: 25/1600Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 25/2200Z NOT AVBL RMK: RADIATION SEV 2024/4 IS IN EFFECT NXT ADVISORY: NO FURTHER ADVISORIES=</p>	<p>FNXX03 EFLK 242123 SWX ADVISORY DTG: 20240324/2123Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/6 NR RPLC: 2024/4 SWX EFFECT: RADIATION SEV OBS SWX: 24/2122Z HNH HSH MNH MSH W180 - E180 ABV FL430 FCST SWX +6 HR: 25/0400Z NOT AVBL FCST SWX +12 HR: 25/1000Z NOT AVBL FCST SWX +18 HR: 25/1600Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 25/2200Z NOT AVBL RMK: SPACE WEATHER EVENT IN PROGRESS CAUSING INCREASED RADIATION LEVELS AT FLIGHT ALTITUDE(S). NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240325/0306Z=</p>	<p>FNXX03 EFLK 250220 SWX ADVISORY DTG: 20240325/0217Z SWXC: PECASUS ADVISORY NR: 2024/7 NR RPLC: 2024/6 SWX EFFECT: RADIATION SEV OBS SWX: 25/0215Z NO SWX EXP FCST SWX +6 HR: 25/0900Z NOT AVBL FCST SWX +12 HR: 25/1500Z NOT AVBL FCST SWX +18 HR: 25/2100Z NOT AVBL FCST SWX +24 HR: 26/0300Z NOT AVBL RMK: EVENT UPDATE. END OF SPACE WEATHER EVENT (SOLAR RADIATION STORM). NXT ADVISORY: NO FURTHER ADVISORIES=</p>

Рисунок 42 — Консультативные сообщения, выпущенные на радиационную обстановку

В ремарке сказано, что происходит событие космической погоды, вызывающее повышение уровня радиации на высоте/высотах полета. В самом первом сообщении высота указывалась выше 580 эшелона потом она опустилась до FL460 и FL430 соответственно. Область воздействия представлена рисунком ниже.



Рисунок 43 — Область распространения ОГЯ

По данным КА "Электро-Л", "Метеор" и "GOES" потоки протонов значительно превысили уровень фоновых значений.

МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ протон·см ⁻² ·сек ⁻¹ ·стер ⁻¹ (КА "МЕТЕОР") НА ТРАССАХ ПКА						
ДАТА	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	
UTC	E>15MeV	E>25MeV	E:20-45MeV	E:10-160MeV		
	UTC	PFU	UTC	PFU	UTC	PFU
20.03.2024		ФОН	ГКЛ			НЕВОЗМУЩЕННАЯ
21.03.2024		ФОН	ГКЛ			НЕВОЗМУЩЕННАЯ
22.03.2024		ФОН	ГКЛ			НЕВОЗМУЩЕННАЯ
23.03.2024		ПОТОКИ	ПРОТОНОВ			СЛАБО ВОЗМУЩЕНА
24.03.2024		ПОТОКИ	ПРОТОНОВ			УМЕРЕННО ВОЗМУЩЕНА
25.03.2024		ФОН	ГКЛ			НЕВОЗМУЩЕННАЯ
26.03.2024		ФОН	ГКЛ			НЕВОЗМУЩЕННАЯ

МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ протон·см ⁻² ·сек ⁻¹ ·стер ⁻¹ (КА "ЭЛЕКТРО-Л") НА ТРАССАХ ПКА						
ДАТА	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	
UTC	E:9-20MeV	E:20-40MeV	E:40-110MeV			
	UTC	PFU	UTC	PFU	UTC	PFU
20.03.2024			ФОН	ГКЛ		НЕВОЗМУЩЕННАЯ
21.03.2024			ФОН	ГКЛ		НЕВОЗМУЩЕННАЯ
22.03.2024			ФОН	ГКЛ		НЕВОЗМУЩЕННАЯ
23.03.2024	18.20	1470	17.55	145	17.40	3.5
24.03.2024	12.30	1260	11.45	83.8	11.55	2.6
25.03.2024	01.35	105	05.35	4.22		
26.03.2024			ФОН	ГКЛ		НЕВОЗМУЩЕННАЯ

МАКСИМАЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ протон·см ⁻² ·сек ⁻¹ ·стер ⁻¹ (КА "GOES") НА ТРАССАХ ПКА						
ДАТА	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	ВРЕМЯ	
UTC	E>10MeV	E>50MeV	E>100MeV			
	UTC	PFU	UTC	PFU	UTC	PFU
20.03.2024			ФОН	ГКЛ		НЕВОЗМУЩЕННАЯ
21.03.2024			ФОН	ГКЛ		НЕВОЗМУЩЕННАЯ
22.03.2024			ФОН	ГКЛ		НЕВОЗМУЩЕННАЯ
23.03.2024	18.00	956	16.00	8.4	16.00	0.7
24.03.2024	12.30	725	01.20	6.18		
25.03.2024	01.30	54.3			ФОН	ФОН
26.03.2024			ФОН	ГКЛ		НЕВОЗМУЩЕННАЯ

Рисунок 44 – Радиационный фон ГКЛ за 23-24 марта 2024 г

Уровень потока частиц с энергией ≥ 10 МэВ достиг в максимуме 1470 p.f.u., что соответствует сильной радиационной буре.

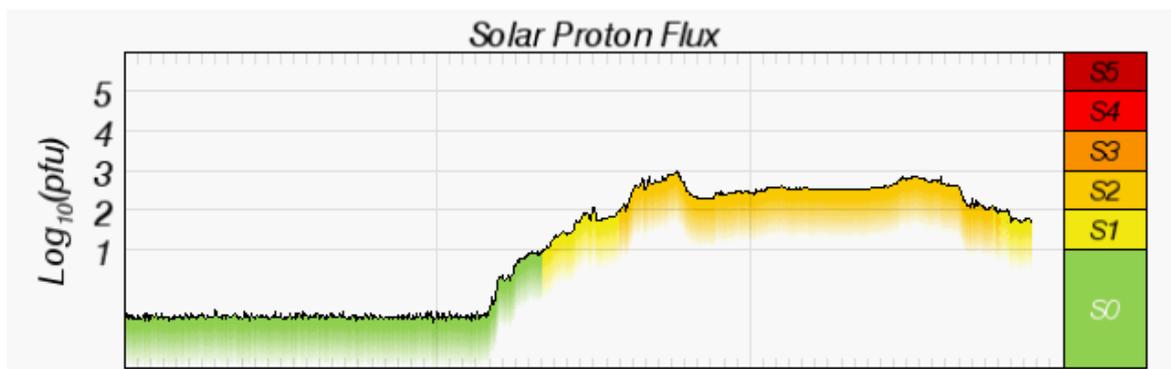


Рисунок 45 – Радиационная буря

Можно сделать вывод о том, что радиационное облучение летного экипажа и пассажиров может значительно увеличиться во время событий с солнечными энергетическими частицами, особенно во время полярных или околополярных полетов. Авионика также может выйти из строя под воздействием высоких уровней радиации.

3.5 Алгоритм составления SIGMET сообщения

SIGMET — это сообщение, предназначенное для информирования пилотов и авиационных организаций о непредвиденных метеорологических условиях, которые могут влиять на безопасность полётов. Это может включать информацию о турбулентности, ледообразовании, вулканическом пепле, тропических циклонах и других значительных явлениях.

В контексте космической погоды SIGMET может быть использован для предупреждения о событиях, таких как солнечные вспышки или геомагнитные бури, которые могут нарушить радиосвязь, навигационные системы или даже привести к радиационному воздействию на высоте. Такие сообщения могут стать важными для авиации, так как космическая погода влияет на работу оборудования и безопасность полётов, особенно на высоких широтах, где такие события более заметны.

Соответственно, был составлен алгоритм действия авиационного синоптика по выпуску SIGMET сообщения на основе консультативного сообщения. Во втором, третьем и четвертом пункте приводятся пороговые

значения, которые нужны для составления сообщения, а также ссылки на соответствующие ресурсы.

1. поступление консультативного сообщения о событии космической погоды
2. для составления сообщения о событиях HF COM: Кр-индекс {<http://ipg.geospace.ru/weekly-geomagnetic-forecast.html>}, уровень рентгеновского излучения {https://xras.ru/sun_flares.html}, данные модели CTIPe (MUF) {https://iswa.ccmc.gsfc.nasa.gov/IswaSystemWebApp/index.jsp?i_1=691&l_1=350&t_1=368&w_1=900&h_1=520&s_1=0}, данные модели D-RAP {<https://www.swpc.noaa.gov/products/d-region-absorption-predictions-d-rap>}
3. для составления сообщения о GNSS: данные модели CTIPe (TEC) {<https://www.swpc.noaa.gov/products/ctipe-total-electron-content-forecast>}, данные о фазовых и амплитудных сцинтилляциях, взятые с приемника Septentrio PolaRx5 {https://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/11}
4. для составления сообщения о RADIATION: данные с риометров {<https://www.nmdb.eu/nest/>}, уровень потока частиц с энергией ≥ 10 МэВ {<http://ipg.geospace.ru/electro-l2-sk1.html>}
5. составление SIGMET
6. рассылка SIGMET авиационным пользователям

На основе поступившего консультативного сообщения о событии HF COM будем составлять SIGMET сообщение:

FNXX02 EFKL 241451

SWX ADVISORY

DTG: 20240324/1451Z

SWXC: PECASUS

ADVISORY NR: 2024/42

NR RPLC: 2024/40

SWX EFFECT: HF COM SEV

OBS SWX: 24/1442Z HNH HSH W180 - E180

FCST SWX +6 HR: 24/2100Z HNH HSH W180 - E180

FCST SWX +12 HR: 25/0300Z HNH HSH W180 - E180

FCST SWX +18 HR: 25/0900Z HNH HSH W180 - E180

FCST SWX +24 HR: 25/1500Z HNH HSH W180 - E180

RMK: SPACE WEATHER EVENT (HF COM POLAR CAP ABSORPTION) IN PROGRESS. IMPACT ON LOWER HF COM FREQUENCY BANDS EXPECTED AT HIGH LATITUDES.

NXT ADVISORY: WILL BE ISSUED BY 20240324/2042Z=

Вторым пунктом выбираем удобный для авиационного синоптика интернет-ресурс, на котором он сможет проанализировать текущую обстановку по Кр-индексу и уровню рентгеновского излучения, таких сайтов три:

<http://ipg.geospace.ru/>

<https://xras.ru/>

<https://www.swpc.noaa.gov/>

Третьим пунктом анализируем максимально применимую частоту (MUF) на основе данных модели CTIPe: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/CTIPe~4.1/>

Четвертым пунктом используем данные модели D-RAP (прогноз поглощения области D): <https://www.swpc.noaa.gov/products/d-region-absorption-predictions-d-rap>

На основе полученной информации составляем SIGMET.

WXRS31 RUSP 241340

ULLL SIGMET 8 VALID 241440/242040 ULLI-

ULLL SAINT-PETERSBURG FIR SEV HF COM WI HNH HSH W180 - E180.
EXPECT INTERMITTENT DISTURBANCES IN COMMUNICATIONS CAUSED
BY HIGH LEVELS OF IONIZING RADIATION.

RMK: OPERATORS ADVISED TO SWITCH TO ALTERNATIVE FREQUENCIES
OR COMMUNICATION METHODS=

После составления сообщения производится рассылка авиационным
пользователям.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ влияния космической погоды на безопасность полётов воздушных судов на основе собранного архива консультативных сообщений за период ноябрь 2023 - май 2024 гг.; рассмотрены события, на которые выдавались консультативные сообщения.

Можно сделать следующие выводы:

- 1) За период январь 2024 – май 2024 гг. было зафиксировано 421 консультативное сообщение, на конец 2023 года было выпущено 578 сообщений;
- 2) Чаще всего сообщения выпускались на сильное (37%) и умеренное (31%) ухудшение спутниковой навигации. Сообщения о умеренном ухудшении высокочастотной связи (25%). Реже всего выпускались сообщения на сильные ухудшения высокочастотной связи, выпущено только три сообщения о повышенной радиационной опасности;
- 3) Частота выпуска сообщений SWX по северному и южному полушарию равны в процентном отношении;
- 4) Чаще всего консультативные сообщения выпускались по экваториальным широтам (60%), в 26% случаев были выпущены сообщения по высоким широтам, с незначительной разницей в процентах сообщения выпускались по дневной стороне (6%) и средним (8%) широтам;
- 5) Текущий двадцать пятый солнечный цикл начался в 2020 году, его активность будет возрастать вплоть до лета 2025 года;
- 6) В 2023 году было зафиксировано 2752 вспышки С-класса, 342 вспышки М-класса и 13 вспышек Х-класса. На 2024 год зафиксировано 1070 вспышки С-класса, 270 вспышки М-класса и 24 вспышек Х-класса.;
- 7) В период с 2023 год по настоящее время наблюдалось 37 геомагнитных бурь G1-класса, 15 бурь G2-класса, 7 бурь G3-класса, 5 бурь G4-класса, 1 буря G5-класса (дата события 12.05.2024);

8) 23-24 марта 2024 года было зафиксировано ухудшение и поглощение связи на частотах выше 35 МГц в основном на полюсах, что было связано с мощной солнечной вспышкой и сильной геомагнитной бурей;

9) 23-24 марта 2024 года радиосигналы претерпевали изменения по фазе и амплитуде из-за ионосферной бури;

10) 23-24 марта 2024 года экипаж и пассажиры на борту самолетов стали более уязвимы для радиационного излучения, эффект сильнее всего ощущался на больших высотах и в высоких широтах;

11) Составлен алгоритм действия авиационного синоптика по выпуску SIGMET сообщения о космической погоде после получения консультативного сообщения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солнечная активность и космическая погода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.janto.ru/repository/018/index.html>
2. Федеральное управление гражданской авиации. Консультативный циркуляр № 00–6В// Вашингтон, США. – 2016. – С.207-212.
3. Международная организация гражданской авиации. Руководство по информации о космической погоде для обеспечения международной аэронавигации // Квебек, Канада. – 2019. – С.50.
4. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Временный инструктивный материал по космической погоде // Москва. – 2019. – С.61.
5. URL: <https://impc.dlr.de/about/space-weather-tutorial> (дата обращения 01.05.2024)
6. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/earths-magnetosphere> (дата обращения 01.05.2024)
7. URL: <https://www.weather.gov/safety/space-storm-types> (дата обращения 01.05.2024)
8. URL: https://swc.nict.go.jp/en/knowledge/ionosphere.html#ionospheric_storm (дата обращения 01.05.2024)
9. URL: <https://www.sws.bom.gov.au/Satellite/6/3> (дата обращения 01.05.2024)
10. Правительство Австралии – Бюро Метеорологии. Космическая погода // Мельбурн, Австралия. – 2023. – С.4.
11. Ogunmodimu, O. Empirical modelling of auroral absorption during disturbed periods of interplanetary coronal mass ejection events / panel Olugbenga Ogunmodimu a b, Farideh Honary b, Neil Rogers b, Ian G. Richardson c d, Bamidele Adebisi a, Victor U.J. Nwankwo // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2020. – С.10.

12. Bain, H. M. NOAA Space Weather Prediction Center Radiation Advisories for the International Civil / H. M. Bain, K. Copeland, T. G. Onsager, R. A. Steenburgh // Space weather. – 2023. – C.19.
13. Paschoa, A.S. Cosmic Radiation, Including its Effects on Airline Crew, Frequent Flyers, and Space Travel / A.S. Paschoa, Friedrich Steinhäusler // Radioactivity in the Environment. – 2010. – C.87-121.