

Гидрометеорология и экология. 2023. №72. С. 449—469.  
Hydrometeorology and Ecology. 2023;(72): 449—469.

## ***METEOROLOGIA. ОБЗОР***

Научная статья  
УДК 656.7:551.590.2  
doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-449-469

### **Влияние космической погоды на безопасность полетов**

***Анастасия Павловна Соколина<sup>1</sup>, Ольга Васильевна Волобуева<sup>2</sup>,  
Яна Викторовна Дробжева<sup>2</sup>, Ирина Александровна Иванова<sup>2</sup>,  
Ирина Викторовна Лаврова<sup>2</sup>, Ольга Николаевна Топтунова<sup>2</sup>***

<sup>1</sup> Северо-Западный филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», Санкт-Петербург, Россия, [nst.palna@yandex.ru](mailto:nst.palna@yandex.ru)

<sup>2</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет

*Аннотация.* В статье приведен обзор космической погоды как гелиогеофизического явления и способы донесения информации о возможной опасности до авиационных пользователей. Рассматривается влияние космической погоды на полеты воздушных судов на примере нескольких мощных солнечных вспышек, изучается влияние опасных гелиогеофизических явлений на высокочастотную связь, спутниковое позиционирование и на радиацию. Проанализирован архив консультативных сообщений о космической погоде за период сентябрь 2020—январь 2023 гг. и текущий двадцать пятый солнечный цикл.

*Ключевые слова:* космическая погода, авиационная метеорология, опасные гелиогеофизические явления, консультативные сообщения, геомагнитные бури, солнечные вспышки.

*Для цитирования:* Соколина А. П., Волобуева О. В., Дробжева Я. В., Иванова И. А., Лаврова И. В., Топтунова О. Н. Влияние космической погоды на безопасность полетов // Гидрометеорология и экология. 2023. № 72. С. 449—469. doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-449-469.

## ***METEOROLOGY. REVIEW***

Original article

### **Impact of space weather on flight safety**

***Anastasia P. Sokolina<sup>1</sup>, Olga V. Volobueva<sup>2</sup>, Yana V. Drobzheva<sup>2</sup>,  
Irina A. Ivanova<sup>2</sup>, Irina V. Lavrova<sup>2</sup>, Olga N. Toptunova<sup>2</sup>***

<sup>1</sup> North-Western branch of the FSBI «Aviamettelecom of Roshydromet», St. Petersburg, Russia, [nst.palna@yandex.ru](mailto:nst.palna@yandex.ru)

<sup>2</sup> Russian State Hydrometeorological University (RSHU), St. Petersburg

*Summary.* Space weather is a combination of various physical processes and phenomena that occur on the surface of the Sun, in interplanetary and near-Earth space, as well as in the magnetosphere, ionosphere

© Соколина А. П., Волобуева О. В., Дробжева Я. В., Иванова И. А., Лаврова И. В., Топтунова О. Н., 2023

and upper atmosphere of the Earth. Space weather disturbances interfere with the correct determination of the aircraft's position in space, can lead to a partial or complete absence of high-frequency communications, and are also harmful to the health of the crew and passengers of aircraft due to an increase in the permissible level of radiation at altitudes. On November 19, 2019, three international global centers were established: the ACFJ consortium (Australia, Canada, France, Japan), the European consortium «PECASUS» and the United States and two regional South Africa and the China-Russian Federation consortium. For the period September 2020 - January 2023, 96 advisory messages were received. Most often, messages were issued for a moderate deterioration in high-frequency communication (34%). The frequency of issuing SWX messages in the northern hemisphere (62%) is associated with high flight intensity and transpolar flights. Advisory messages were often issued for high latitudes (40%), as the most vulnerable to solar activity due to the characteristics of the Earth's magnetic field and radiation belt. The influence of the solar flare on November 3, 2021 on high-frequency communications is considered using the GIRO ionospheric model as an example. The influence of the coronal mass ejection on October 9, 2021 is also analyzed, the influence of the substorm on the neutron monitor installed in Apatity is considered, and a conclusion is made according to the data on phase and amplitude scintillations. Also, studies were carried out on the level of limiting radiation along three routes, produced at high, middle and equatorial latitudes according to the model of the Fedorov Institute of Applied Geophysics.

*Keywords:* space weather, aviation meteorology, dangerous heliogeophysical phenomena, advisory phenomena, geomagnetic storms, solar flares.

*For citation:* Sokolina A. P., Volobueva O. V., Drobzheva Y. V., Ivanova I. A., Lavrova I. V., Toptunova O. N. Impact of space weather on flight safety. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2023;(72): 449—469 (In Russ). doi: 10.33933/2713-3001-2023-72-449-469.

## Введение

Космическая погода — это совокупность различных физических процессов и явлений, которые возникают на поверхности Солнца, в межпланетном и околоземном космическом пространстве, а также в магнитосфере, ионосфере и верхних слоях атмосферы Земли. Возмущения космической погоды нарушают спутниковую навигацию и мешают корректному определению местоположения самолета в пространстве, способны привести к частичному или даже полному отсутствию высокочастотной связи, а также оказывают вредоносное воздействие для на здоровье экипажа и пассажиров воздушных судов из-за повышения допустимого уровня радиации на высотах. В связи с ростом технологического прогресса и слабой освещённости данной темы актуальность работы не вызывает сомнений.

Целью работы является исследование космической погоды как опасного для авиации явления, способов ее прогнозирования и донесение информации об активности солнца до авиационных пользователей. Для решения поставленной цели были выполнены следующие задачи: создан архив консультативных сообщений о космической погоде за период сентябрь 2020 — январь 2023 гг.; проведена оценка солнечной активности за двадцать пятый солнечный цикл; исследовано влияние солнечной активности на ионосферу и высокочастотную связь, на спутниковое позиционирование систем GPS и ГЛОНАСС, на радиационную обстановку. Статья носит обзорный характер, демонстрируя влияние космической погоды на безопасность воздушных судов.

## Космическая погода как опасное для авиации явление и способы ее прогнозирования

После нескольких масштабных геомагнитных бурь, повлекших за собой изменение трасс полетов воздушных судов и рост радиационной опасности

для летного экипажа, ИКАО вынесло решение о создании специализированной службы, необходимой для аэронавигации, которая бы следила за космической погодой. 19 ноября 2019 года была создана служба непрерывного мониторинга космической погоды, которая обязана предоставлять авиации консультативные сообщения о космической погоде. Всего было создано три международных глобальных центра: консорциум ACFJ (Австралия, Канада, Франция, Япония), европейский консорциум PECASUS и США. Также были созданы два региональных центра: ЮАР и консорциум Китай-Российская Федерация. Россию представляет Институт прикладной геофизики им. Е. К. Фёдорова (ИПГ) [1].

Глобальные центры космической погоды проводят дежурства, наблюдая за активностью Солнца, космическими лучами, состоянием магнитосферы и ионосферы, а также за составом высокоэнергичных частиц в атмосфере Земли. Дежурства делятся по две недели, причем один из центров выполняет функции дежурного центра — On Duty Center (ODC), а другие считаются основными и вспомогательными резервными центрами. Каждый из центров космической погоды обладает обширной сетью наземной и спутниковой аппаратуры [1, 2].

Наблюдения за солнечной активностью осуществляются с использованием разных диапазонов длин волн. Например, в видимом, ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах, производятся наблюдения с помощью солнечных телескопов. У них есть свои особенности: солнечные телескопы, как известно, работают в дневное время суток. За счет нагрева земной поверхности и усиления турбулентности их разрешающая способность ухудшается, поэтому оборудование окрашивают в белый цвет, как и метеорологические будки, а сами телескопы устанавливают на башнях. Также из-за высокой тепловой нагрузки в современных телескопах предусмотрены системы охлаждения [3].

Коронографы предназначены для наблюдений за солнечной короной. Наземные коронографы используют явление поляризации, чтобы получить снимок короны, спутниковые — несколько затенителей. Спектрогелиографы — приборы, используемые для монохроматического изображения Солнца, то есть на одной длине волны. Обычно данные приборы установлены на борту космических спутников [4].

Несмотря на то, что явления космической погоды могут возникнуть за короткое время, их влияние проявляется практически сразу и длится до нескольких дней. С точки зрения авиации, опасными явления считаются тогда, когда солнечная активность и/или космические лучи становятся причиной неполадок в работе систем связи, навигации, наблюдения за воздушным судном и повышением критического уровня радиации. Для международной авиационной службы центры космической погоды рассматривают только конкретные возмущения: геомагнитные и ионосферные бури, солнечные вспышки и солнечную радиацию [1, 2].

В настоящее время основными геоэффективными проявлениями космической погоды являются: солнечные радиовсплески, влияющие на работу приемных радиосредств; наведенные геоэлектрические поля, влияющие на проводные системы энергоснабжения и связи; ионизирующая радиация, влияющая на работоспособность

электронной аппаратуры и жизнедеятельность организмов; расширение верхних слоев атмосферы, ведущее к повышению температуры и плотности этих слоев и влияющее на динамику и время жизни искусственных спутников Земли; а также ионосферные возмущения, влияющие на процессы распространения и рассеяния радиоволн. При этом очевидна необходимость качественного прогноза параметров космической погоды. Известно, что Солнце является источником корпускулярного и волнового излучения. Корпускулярное излучение, достигая границы магнитосферы Земли, взаимодействует с ней, что приводит к возникновению электрических полей и токов в магнитосфере. Высыпание заряженных частиц из магнитосферы в области магнитных полюсов увеличивает электронную концентрацию в ионосфере, что приводит к усилению поглощения радиоволн, вследствие чего происходит понижение амплитуды или пропадание радиосигналов на трассах, проходящих через эти области.

Наличие солнечного ветра способно изменить размеры и форму магнитосферы, что приводит к сдвигу географической области явлений, связанных с высыпаниями частиц (полярные сияния, сильные ионосферные токи, поглощение радиоволн), от высоких широт к средним. Более 8000 авиационных полетов в год происходит над Северным полюсом, что ведет к необходимости учета влияния доз солнечной радиации на здоровье летного состава, пассажиров, а также на состояние электронной аппаратуры. Основным эффектом влияния волнового излучения от Солнца является существование ионосферы — ионизированного солнечным излучением плазменного слоя в нейтральной атмосфере Земли. Изменение электронной концентрации на различных высотах над Землей может являться одним из следствий возмущений в солнечном ветре и, следовательно, оказывать негативное влияние на распространение радиоволн.

Поскольку данный слой атмосферы ионизирован, то он обладает способностью отражать коротковолновые частоты, обеспечивая надежную радиосвязь, что важно для полетов воздушных судов. Во время геомагнитных бурь в ионосферу поступает дополнительная энергия, появляется избыточная ионизация, вызывающая деформацию слоя. Из-за этого происходят сбои в высокочастотной связи, так как радиоволны поглощаются или отражаются. Воздействие солнечной вспышки на ионосферу длится от нескольких минут до нескольких часов и называется ионосферным штормом.

Функционирование радиосредств определяется совокупностью электромагнитных процессов внутри и снаружи устройства. Наведение электромагнитных полей в проводниках внутри радиоустановки, изменение потенциалов за счет дополнительной ионизации фоновым излучением, возникновение дополнительных токов за счет проникновения дополнительных зарядов извне, а также повышение фонового электромагнитного излучения и концентрации различных частиц во время возмущений может приводить к сбоям в работе радиоаппаратуры и изменению характеристик оборудования под действием частиц. Внезапные усиления радиоизлучения (солнечные радиовсплески), испытывающие вариации интенсивности, вызывают неожиданные помехи в работе радиолокационной, радиосвязной и радиоприемной аппаратуры.

Геомагнитные возмущения могут способствовать усилению токов в коре Земли, в основном за счет усиления авроральных токов в полярной ионосфере, и влияют на стабильность функционирования электрических систем. В настоящее время используются системы прогноза геоэлектрических полей. Кроме того, воздействие ионизирующей радиации на электронные устройства приводит к изменению их характеристик (постоянному и временному) за счет приходящей радиации или атмосферных процессов, вызванных ею. Например, ухудшение эффективности солнечных панелей спутников в среднем за счет действия солнечной радиации составляет порядка 5 % в год; деградация и потеря оптической и электронной аппаратуры спутников.

Основные радиосредства, находящиеся под влиянием космической погоды — это средства КВ-радиосвязи, средства связи «поверхность—космос», глобальные навигационные системы, загоризонтные радиолокаторы, спутниковые высотомеры и радары космического базирования. Устойчивость функционирования большинства этих средств определяется ионосферными условиями. Влияние космической погоды на КВ-диапазон весьма существенно и включает в себя практически весь спектр эффектов, наблюдаемых в остальных диапазонах: поглощение за счет ионизации во время солнечных вспышек, поглощение в полярной шапке, радиоаврору, многомодовое распространение, групповые и фазовые задержки за счет рефракции и т.д. [1, 5—8].

В настоящее время имеется много центров прогнозирования параметров космической погоды, одним из которых является the Center for Space Weather Forecasts (CSWF) в ИЗМИРАНе. Предсказания параметров ионосферы осуществляются на основе прогноза солнечной и геомагнитной активностей, при этом наиболее популярным является индекс солнечной активности F10.7 в виде среднесуточного значения, а в серии геомагнитных индексов — среднесуточный индекс Ap с заблаговременностью 8 и 55 дней, вероятность максимального Kp индекса на 8 дней вперед, его трехчасовые значения на 3 дня вперед. Существует автоматическая система краткосрочного прогноза (за 1—3 часа) Ap и Dst индексов, используются эмпирические модели ионосферы, как IRI [2], IRI-Plas и другие. В эмпирических моделях полного электронного содержания ТЕС наиболее используемыми являются комбинации индекса F10.7. ТЕС используется для определения foF2, так как обеспечивает более полный охват земного шара, чем ионосферные станции и наблюдается высокая корреляция между foF2 и ТЕС. Для прогнозирования возмущенных значений используются индексы Kp и Dst [8, 9].

Коротковолновый диапазон с низкими частотами обеспечивает дальнюю связь, отражаясь обратно к Земле, тогда как с высокими частотами обеспечивается связь с космическими спутниками: волны проходят через ионосферу и теряют амплитудную и частотную стабильность. Также имеются свои широтные особенности, поскольку влияние геомагнитных бурь на ионосферу в зонах экватора и полярных шапок неодинаковое из-за земной магнитосферы. Так, в полярных широтах уровень ионизации во время ОГЯ может достичь критических значений, образуя поглощения полярной шапки, в которых особенно часто пропадает КВ-сигнал. В зоне экватора у ионосферы есть свои аномалии, связанные

с линиями магнитного поля Земли — это экваториальный фонтан и экваториальный электроджет [6—9].

В статьях ученых Бостонского университета К. Гровес, С. Басу, П. Дж. Султан «Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: current status and future plans» подробно рассмотрен процесс образования облаков с высокой электронной концентрацией в ионосфере, из-за которых непредсказуемо ухудшается спутниковая связь и навигация, причем данный эффект наиболее интенсивен в экваториальной области, умеренно влияет в высоких широтах и минимально в средних. Отметим, что, согласно их мнению, это происходит из-за того, что ионосфера способна внутренне контролировать генерацию неоднородностей в экваториальной области из-за взаимодействия с солнечными переходными процессами. В высоких широтах механизмы генерации несколько иные и обусловлены скорее магнитосферными процессами, именно поэтому их легче проследить, так как это ответная реакция на солнечные вспышки и корональные выбросы масс. Кит Гровес и Сунанда Басу [8] также разработали систему отслеживания ионосферных мерцаний в экваториальной зоне: геостационарный спутник, проводящий мониторинг экваториального пояса, оснащен соответствующим набором датчиков, способных обнаружить ионосферные неоднородности. С помощью модели ионосферы и данных с этого спутника можно спрогнозировать формирование и перемещение ионосферных мерцаний в ионосфере [8].

Опасные гелиогеофизические явления влияют на спутниковую навигацию следующим образом:

- появляются шумы в сигнале из-за радиоизлучения Солнца;
- приемники теряют захват сигнала;
- местоположение может быть рассчитано некорректно.

Все спутники GNSS имеют две частоты для передачи сигналов со спутника на наземный приемник: 1575,42 МГц и 1227,60 МГц. Во время солнечных вспышек излучение от Солнца генерируется на таких же длинах волн [1, 9—12].

Ошибка в определении местоположения объекта из-за ионосферных бурь является наиболее распространенной. Из-за солнечной активности изменяется общая для ионосферного слоя концентрация заряженных частиц, причем степень изменения сложно определить обычными моделями, так как необходимо узнать влияние для определенных частот, на которых действуют системы GNSS. Стоит учитывать и то, что в ионосфере могут образоваться области, где концентрация электронов будет сильно повышена (понижена) по сравнению с общим слоем. Такие пятна приводят к тому, что скорость сигнала непредсказуемо изменяется. Соответственно, определяемое расстояние через точку отражения увеличивается (уменьшается) на десятки метров по сравнению с реальными значениями. При этом, когда спутниковый сигнал сталкивается с препятствиями в виде резко возросшей энергии частиц (нейтронов и протонов), его фаза и амплитуда очень быстро изменяются. Мерцания могут сделать вычисления местоположения самолета невозможным [9—12].

Во время солнечных бурь и высокоинтенсивных галактических космических лучей протоны на огромной скорости достигают околоземного пространства и

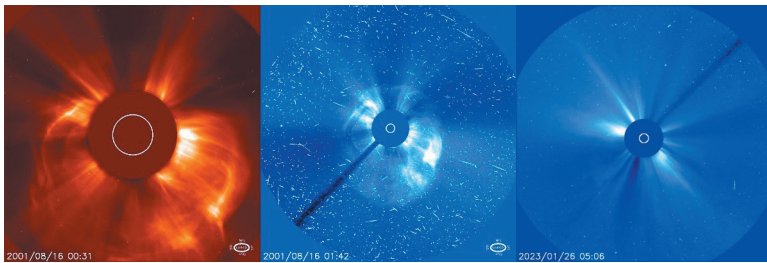


Рис. 1. Снимки заряженных частиц с коронографа LASCO-3 (Large Angle and Spectrometric Coronagraph-3) [1].

Fig. 1. Images of charged particles from the LASCO-3 coronagraph [1].

проникают в атмосферу на магнитных полюсах и в радиационный пояс нашей планеты. Сталкиваясь с частицами, находящимся в радиационном поясе, они порождают вторичные и третичные высокоэнергичные элементы, которые и создают основную опасность для летных экипажей. Очевидно, что в полярных широтах и на большой высоте эффект облучения сильнее. Поток высокоэнергичных частиц опасен не только для здоровья, но и для электроники [13—17].

Информация о потоке протонов с высокой энергией поступает с космических аппаратов SOHO при помощи коронографов LASCO-3. Например, на рис. 1 приведено изображение, полученное во время интенсивного коронального выброса массы 16 августа 2001 года. Это снимки, показывающие корональный выброс масс в видимом спектре, и снимок коронографа, на котором хорошо видны заряженные частицы. Также на рис. 1 приведено изображение с LASCO-3 во время отсутствия солнечных бурь [1].

На поверхности Земли потоки заряженных частиц фиксируются с помощью специальных приборов — нейтронных мониторов. Данные детекторы регистрируют вторичные заряженные частицы. Если более трех нейтронных мониторов улавливают увеличение радиации, значит, велик риск дополнительной дозы радиации на воздушном судне. Больше всего подвержены влиянию радиации самолеты, совершающие трансполярные перелеты [1, 18].

Японской группой ученых были проведены исследования воздействия радиации на экипаж во время нескольких дальнемагистральных полетов с использованием двух небольших коммерческих электронных персональных дозиметров: фотонный NRF20 и нейтронный NRY21 производства Fuji Electric Systems Co. Ltd. для радиационной защиты на ядерных предприятиях и объектах. Подробно отчеты их работы изложены в докладе «Measuring cosmic-ray exposure in aircraft using real-time personal dosimeters». Отметим, что измерения с фотонного дозиметра согласуются с расчетными дозами EPCARD (European Program Package for the Calculation of Aviation Route Doses) с разницей в 8 %, однако данные с нейтронного дозиметра в 5—15 раз превышали расчеты EPCARD. Скорее всего, это связано с техническими несовершенствами персональных приборов. Расскажем подробнее про EPCARD. Это специальное программное обеспечение, рассчитывающее

радиационное облучение экипажей самолетов, позволяющее оценить риски на любом авиационном маршруте и для любого профиля полета на высотах от 5 до 25 км. Программа виртуально имитирует полет с временным разрешением 1 минута в квазиреальном поле излучения вторичных частиц. В программе используются энергетические спектры нейтронов, протонов, фотонов, позитронов, мюонов и пионов, рассчитанных по методу Монте-Карло на различных высотах в атмосфере [19, 20].

Точность расчета данной модели была проверена при совершении трансполярного перелета Сеул-Нью-Йорк. Для исследования использовался переносной нейтронный монитор WENDI-II, который достаточно хорошо реагирует на нейтроны космического излучения. Измерения были проведены 5—6 ноября 2011 г. Время полета составило около 14 часов. Наблюдения, полученные в эквиваленте амбиентной дозы на 1 см, хорошо коррелировали с модельными расчетами EPCARD [21].

### **Донесение информации о солнечной активности до авиационных пользователей**

Существует несколько пороговых значений, предназначенных для выпуска консультативных сообщений о космической погоде. Сообщения выпускаются в случае умеренных или сильных возмущений [1, 2].

*Таблица 1*

Пороговые значения от ИКАО для выпуска SWX  
Thresholds from ICAO for issuing SWX

	Явление	Умеренное	Сильное
Нарушение ВЧ-связи	Уменьшение MUF	30%	50%
	Мощность рентгеновского излучения	$10^{-4}$ нм	$10^{-3}$ нм
	Авроральное поглощение	$K_p = 8$	$K_p = 9$
Радиационное облучение	Мощность дозы	30 мкЗв/ч	80 мкЗв/ч
Спутниковая навигация	Вертикальное ПЭС	125 ПЭС	175 ПЭС
	Фазовые сцинтилляции	0,4 рад	0,7 рад
	Амплитудные сцинтилляции	0,5	0,8

Консультативные сообщения, согласно приказу АМТК «О предоставлении консультативных сообщений о космической погоде» от 18.11.2019, необходимо включать в полетную документацию и при устной консультации обращать на них внимание эксплуатантов и членов лётных экипажей. Для диспетчерских составов необходимо включать консультативные сообщения в презентации, а также передавать их по электронной почте руководителям полетов. Синоптики получают данные из АСПД, откуда оперативный работник может их извлечь, применяя специальные индексы глобальных центров космической погоды: EFKL (Хельсинки), EGRR (Великобритания), LFPW (Тулуза), YMMC (Мельбурн), KWNP (США), UUAG (ИПГ им. Е. К. Фёдорова), ZBVB (Китай) [1, 2].



В зависимости от опасности солнечного возмущения и степени его влияния на Землю, в частности, на полеты воздушных судов, Центры полетной информации (ЦПИ), Районные, Региональные или Зональные диспетчерские центры (РДЦ, РегДЦ, ЗДЦ соответственно), а также авиакомпании и непосредственно сами пилоты могут принимать следующие решения [1—3]:

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

Авиационным пользователям информация о космической погоде поступает из глобальных консультативных центров в виде сообщений о космической погоде. Консультативные сообщения информируют о типе воздействия (HF COM, GNSS, RADIATION), о его интенсивности (MOD — умеренная или SEV — сильная), о его начале и продолжительности, а также о пространственной протяженности на ближайшие сутки. Для пространственной протяженности используются описания в виде широтных полос [1, 2].

На рис. 2 приведен пример консультативного сообщения, которое было получено в 21:35 UTC 31 июля 2021 года. Сообщение свидетельствует о сильном ухудшении спутниковой навигации, которое наблюдалось в пределах  $5^{\circ}$  з.д. —  $35^{\circ}$  в.д. высоких широт Северного полушария. В последующие сутки ухудшение GNSS не ожидается. В ремарке дана краткая характеристика причин возникновения ОГЯ: возмущение космической погоды происходит *in situ* и выражено в виде

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

Рис. 2. Пример консультативного сообщения о космической погоде.

Fig. 2. Example of a space weather advisory message.

ионосферной бури, влияющей на характеристики спутниковой связи. Возможны потери сигнала и/или ухудшение характеристик позиционирования и времени. Выпуск следующего сообщения ожидается в 02:52 UTC 1 августа 2021 года [1].

### **Оценка солнечной активности в двадцать пятом солнечном цикле**

Исследование космической погоды как опасного для авиации явления проводилось статистическими и аналитическими методами. База данных консультативных сообщений основана на архиве данных АМЦ «Пулково». В открытом доступе консультативных сообщений нет. Был рассмотрен период сентябрь 2020—январь 2023 гг., всего получено 96 консультативных сообщений. Стоит отметить, что космическая активность в летние периоды снижена, возможно, это связано с тем, что в зимний период Солнце ближе к Земле именно в Северном полушарии. Стоит отметить и то, что за период сентябрь 2020 — апрель 2021 гг. большинство сообщений выпускалось в тестовом режиме. В дальнейшем несколько изменилась частота и формат самих сообщений: они стали выпускаться чаще, к тому же в строке RМК информация дается четче, полнее и однообразнее по формату, вследствие чего она легче воспринимается авиационными пользователями. Можно предположить, что изменения в лучшую сторону происходят из-за того, что постепенно консультативные сообщения входят в привычный круг деятельности синоптиков, работающих в SWPC [1].

Чаще всего сообщения выпускались на умеренное ухудшение высокочастотной связи HF COM MOD (34 %). Сообщения о разной степени ухудшения спутниковой навигации GNSS MOD, SEV занимают практически равные проценты (умеренное — 27 %, сильное — 26 %). Реже всего выпускались сообщения о сильных ухудшениях высокочастотной связи HF COM SEV. Это может объясняться тем, что сильные солнечные вспышки и корональные выбросы масс возникают не так часто, а также с тем, что данное явление более локальное и чаще всего появляется вследствие суббурь. Кроме того, не было выпущено ни одного сообщения о повышенной радиационной опасности RADIATION MOD, SEV. Действительно, с ростом солнечной активности потоки ГКЛ и СКЛ уменьшаются, однако двадцать пятый солнечный цикл только начался и еще не достиг своего пика. Возможно, консультативные сообщения на данное явление предпочитают не выпускать, чтобы не терпеть убытки, связанные с авиаперевозками, которые могут быть из-за паники среди пассажиров авиакомпаний и летных экипажей [1].

Рассматривая выпущенные консультативные сообщения по зонам их возникновения можно отметить, что частота выпуска сообщений SWX по Северному полушарию (62 %) связана с высокой интенсивностью полетов и трансполярными перелетами. К тому же консультативные сообщения часто выпускались для высоких широт (40 %), как наиболее уязвимым для солнечной активности из-за особенностей магнитного поля Земли и радиационного пояса. Отметим, что при геомагнитных бурях явление происходит на двух полюсах. С незначительной разницей в процентах сообщения выпускались по экваториальным (30 %) и средним (28 %) широтам, поскольку при высокой активности Солнца в виде солнечных

вспышек и СМЕ обычно затрагиваются обширные широтные пространства нашей планеты [1].

На рис. 3 представлен временной ход солнечных пятен: среднемесячных значений и усредненных, представляющих собой усредненное количество солнечных пятен за статистический период, а также прогноз солнечных пятен до июля 2025 года согласно данным ISES. Очевидно, что цикл солнечной активности движется к своему максимуму, так как чем больше солнечных пятен, тем больше областей, в которых потенциально могут возникнуть солнечные вспышки и корональные выбросы масс, поэтому проблема космической погоды в ближайшее время будет актуальна. Окончание 25-го солнечного цикла ожидается в 2033 году. Вместе с тем столетний солнечный цикл находится в относительном минимуме [1, 22—25].

Стоит отметить, что по сравнению с 2020 г. количество солнечных пятен в 2022 г. увеличилось почти в 8 раз (8 солнечных пятен за 2020 г. и 78 солнечных пятен в 2022 г.). Вспышечная активность сильнее проявлялась в 2021 году (84 солнечных вспышки за 2020 г., 427 вспышки за 2021 г., 185 вспышек за 2022 г.). Более того, в 2021 году было зафиксировано 398 вспышек С-класса, 27 вспышек М-класса и 2 вспышки Х-класса. По прогностическим данным ISES, в 2023 году ожидается 224 вспышки С-класса, 39 вспышек М-класса и 3 вспышки Х-класса, несмотря на ожидаемое малое количество солнечных пятен (136). В январе 2023 г. солнечная активность проявилась в виде нескольких вспышек. В этот период были выпущены консультативные сообщения о влиянии вспышек на спутниковую связь от сильного до умеренного. Например, 10 января 2023 г., когда

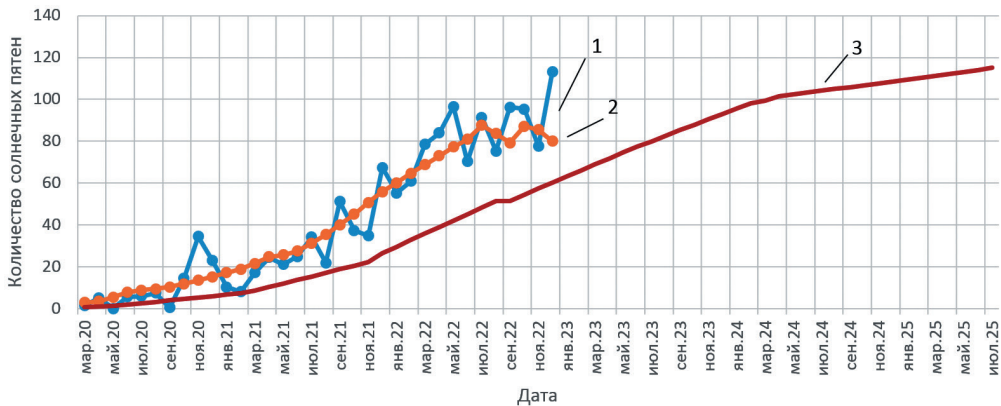


Рис. 3. Количество солнечных пятен в 25-ом солнечном цикле.

1 — среднемесячное количество солнечных пятен, 2 — ежемесячное усредненное количество солнечных пятен, 3 — прогностическое количество солнечных пятен на первую половину 25-го солнечного цикла.

Fig. 3. The number of sunspots in the 25th solar cycle.

1 — the monthly average number of sunspots, 2 — the monthly average number of sunspots, 3 — the predicted number of sunspots for the first half of the 25th solar cycle.

происходило больше всего вспышек, был отмечен максимум количества солнечных пятен [1, 26].

Согласно окончательному Кр-индексу, представленному на сайте GFZ Потсдам, количество дней в году, когда наблюдались геомагнитные бури, увеличивается аналогично с приближением 25-го солнечного цикла к своему максимуму (9 дней в 2020 г., 30 дней в 2021 г., 55 дней в 2022 г.). Геомагнитных бурь интенсивностью G4 было крайне мало, всего одна в 2021 г., что соответствует общей тенденции количества солнечных вспышек на Солнце. Бурь интенсивностью G5 не наблюдалось. Такие бури крайне редки и в последний раз фиксировались только один раз в 2000 г. и два раза в 2003 г. [1, 26].

### Влияние космической погоды на ионосферу и высокочастотную связь

3 ноября 2021 года произошла солнечная вспышка класса M1.7, повлекшая за собой мощный выброс корональных масс. Высокоскоростной поток, связанный с солнечным ветром, согласно данным нейтронного монитора, установленного в Новосибирске, вызвал резкий спад плотности и интенсивности галактических космических лучей. Небольшое повышение потока перед резким спадом ГКЛ (галактических космических лучей) связано с фронтом ударной волны (рис. 4) [1, 26].

Индекс геомагнитной активности Кр достиг значений 7, что соответствует уровню сильной геомагнитной бури класса G4. По данным спутника ACE, скорость солнечного ветра с 3 по 4 ноября 2021 г. достигла пикового значения 832 м/с, а температура — более 1 млн К. Также существенно выросла концентрация протонов — до 36 частиц/см<sup>3</sup>. В результате над частью Западного и над Восточным полушариями произошло значительное нарушение коротковолновой связи. Консультативные сообщения о космической погоде на умеренное ухудшение высокочастотной связи были выпущены 4 и 5 ноября. Отметим, что радиосвязь ухудшается из-за влияния опасных гелиогеофизических явлений на ионосферу. Этот слой атмосферы ионизирован, и во время геомагнитных бурь возникает избыточная ионизация, радиоволны теряют амплитудную и частотную стабильность,

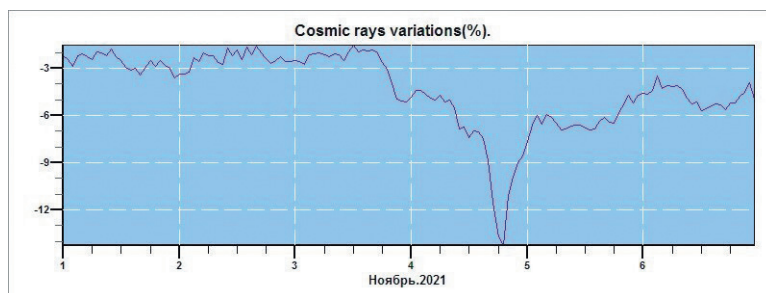


Рис. 4. Поток галактических космических лучей в ноябре 2021 г.

Fig. 4. Galactic cosmic ray flux in November 2021.

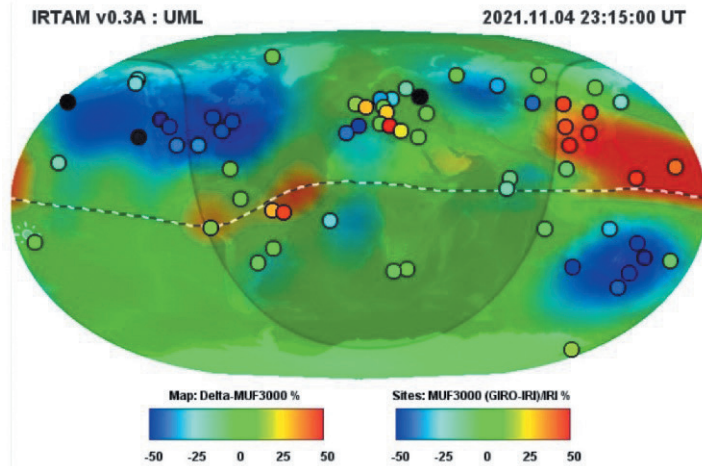


Рис. 5. Модель ионосферы от GIRO за 04.11.2021 г. Цветные точки обозначают локальные отклонения MUF от международной модели эталонной ионосферы в спокойное время (IRI). Также цветные точки являются пунктами, где выпускают зонды от GIRO. Красные области — зоны, где MUF (максимально применимая частота) существенно снизилась [27].

Fig. 5. Ionospheric model from GIRO for 04.11.2021. Colored dots represent local deviations of the MUF from the International Quiet Time Reference Ionosphere Model (IRI). Also, the colored dots are the points where GIRO probes are released. The red areas are areas where the MUF (maximum usable frequency) has dropped significantly [27].

могут появиться шумы, затухания или блэкаут. Коротковолновая связь активно используется при трансокеанских и трансполярных областях из-за особенности обслуживания полетов [1].

Как следует из консультативных сообщений, в первых трех из них неблагоприятное явление ожидалось только в полярных областях. Затем зона ухудшения высокочастотной связи сместилась только на Северный полюс, а в дальнейшем — и на все Северное полушарие до экваториальных широт. Согласно информации, полученной по модели GAMBIT, отчетливо видно, что MUF (максимально применимая частота) снизилась примерно на 50 % во время геомагнитной бури (рис. 5) [1, 27].

### Влияние космической погоды на системы навигации

Воздействие ионосферной бури отрицательно сказывается на космической навигации и спутниковом позиционировании, так как сигнал, отправленный спутником, должен пройти через ионизирующий слой, прежде чем достичь приемника. Когда спутниковый сигнал сталкивается с нейтронами и протонами, его фаза и амплитуда могут очень быстро измениться, вследствие чего в спутниковую навигацию вносятся ошибки позиционирования. Эти изменения называются

сцинтилляциями. В качестве меры для оценки уровня колебаний используются амплитудные индексы ( $S_4$ ) и фазовые индексы ( $\sigma_\phi$ ) [1, 5—7].

9 октября 2021 г. произошла солнечная вспышка класса M1.6. Космический аппарат ACE зафиксировал повышение скорости и температуры солнечного ветра, концентрация протонов 12 октября составила 39 частиц/см<sup>3</sup>. Индекс Kp достиг значения 6, что соответствует уровню сильной магнитной бури. 11—12 октября 2021 года было получено 6 консультативных сообщений. Согласно данным об индексе AE, являющимся суммой индексов AU и AL, интенсивность возмущения магнитного поля резко возросла на период 11—12 октября 2021 года. Индекс AE достиг своего максимума в 11 UTC 12 октября (2600 нТл) [1].

Для исследования влияния солнечной активности на спутниковую связь были использованы данные о фазовых и амплитудных сцинтилляциях, взятые с приемника Septentrio PolaRx5, установленного в Апатитах, для двух глобальных навигационных систем — российской ГЛОНАСС и американской GPS. Также на графиках (рис. 6) представлены горизонтальные и вертикальные компоненты геомагнитного поля, с помощью которых можно дать оценку мощности геомагнитного шторма и амплитуду ультранизких частот в горизонтальных и вертикальных компонентах [1, 10].

На графике видно, что максимум амплитуды мощности геомагнитной бури составил 800 нТл в горизонтальной компоненте. Вертикальная компонента значительно повысилась только в промежуток между 02 и 05 UTC 12 октября. Геомагнитная буря вызвала сильные сцинтилляции как для российских спутников, так и для американских. В результате  $\sigma_\phi$  превысил критические значения в дневное и ночное время. Возможно, увеличение фазовой амплитуды в вечерние часы 12 октября обусловлено значительными колебаниями горизонтальной компоненты геомагнитной бури, причем реакция спутниковой связи на отрицательные показатели сильнее, о чем свидетельствует участок на графике с 19 UTC 11 октября по 04 UTC 12 октября, относительно промежутка 13—16 UTC (рис. 6).

Можно сделать вывод о том, что у фазовых сцинтилляций отсутствует прямая корреляция с амплитудой возмущения геомагнитной бури. С ростом амплитуды геомагнитных пульсаций увеличиваются значения  $\sigma_\phi$ . Некоторые всплески в горизонтальной и вертикальной компонентах ультранизких частот не соответствуют изменению фазовых и амплитудных колебаний сигналов GNSS и не коррелируются с геомагнитными возмущениями. Следовательно, изменения горизонтальных и вертикальных компонент ультранизких частот вызвали случайные высыпания авроральных частиц. Отметим, что наиболее сильные сцинтилляции имеют прямую корреляцию по времени своего возникновения с ростом амплитуды ультранизких волн (рис. 6) [1, 10].

### **Влияние космической погоды на радиационную обстановку в атмосфере Земли**

Во время солнечных бурь и высокоинтенсивных галактических космических лучей протоны проникают в атмосферу. Сталкиваясь с частицами, уже

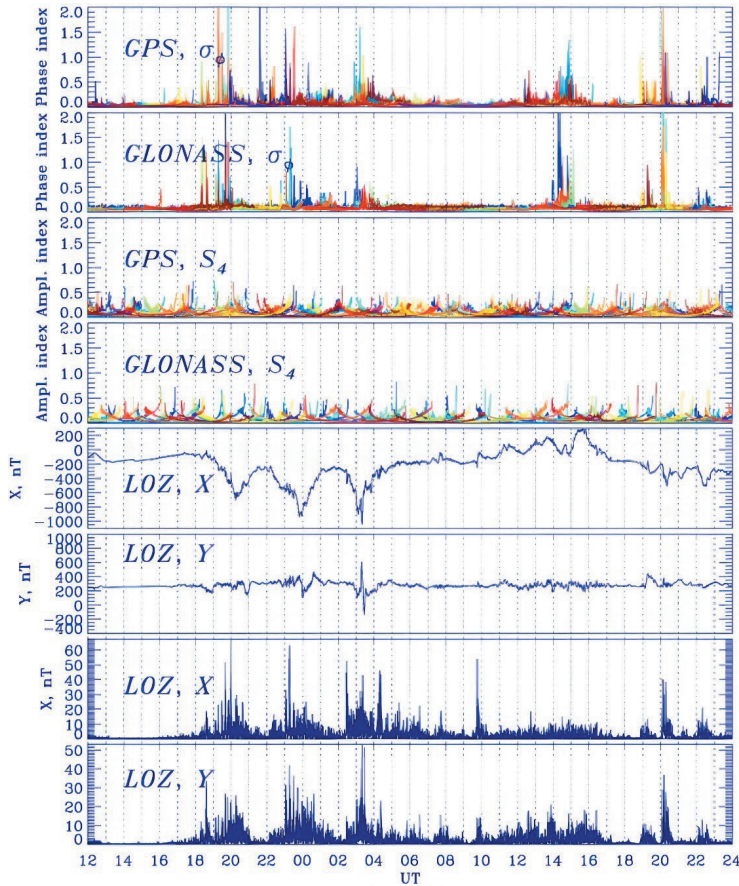


Рис. 6. Фазовые и амплитудные сцинтилляции за 11—12 октября 2021 г.

GPS,  $\sigma_\phi$  — фазовые сцинтилляции с приемника Septentrio PolaRx5 для GPS-системы. GLONASS,  $\sigma_\phi$  — фазовые сцинтилляции с приемника Septentrio PolaRx5 для GLONASS-системы. GPS,  $S_4$  — амплитудные сцинтилляции с приемника Septentrio PolaRx5 для GPS-системы. GLONASS,  $S_4$  — амплитудные сцинтилляции с приемника Septentrio PolaRx5 для GLONASS-системы.

LOZ, X (от 200 нТл до –1000 нТл) — горизонтальные компоненты геомагнитного поля.

LOZ, Y (от 1000 нТл до –400 нТл) — вертикальные компоненты геомагнитного поля.

LOZ, X (от 60 до 0 нТл) — амплитуда ультранизких частот волн в горизонтальной компоненте.

LOZ, Y (от 50 нТл до 0 нТл) — амплитуда ультранизких частот волн в вертикальной компоненте.

Fig. 6. Phase and amplitude scintillations from 11 to 12 October 2021.

GPS,  $\sigma_\phi$  — phase scintillations from the Septentrio PolaRx5 receiver for the GPS system. GLONASS,  $\sigma_\phi$  — phase scintillations from the Septentrio PolaRx5 receiver for the GLONASS system. GPS,  $S_4$  — amplitude scintillations from the Septentrio PolaRx5 receiver for the GPS system. GLONASS,  $S_4$  — amplitude scintillations from the Septentrio PolaRx5 receiver for the GLONASS system. LOZ, X (from 200 nT to –1000 nT) — the horizontal components of the geomagnetic field. LOZ, Y (from 1000 nT to –400 nT) — the vertical components of the geomagnetic field. LOZ, X (from 60 to 0 nT) — the amplitude of ultralow wave frequencies in the horizontal component. LOZ, Y (from 50 nT to 0 nT) — the amplitude of ultralow wave frequencies in the vertical component. [10]

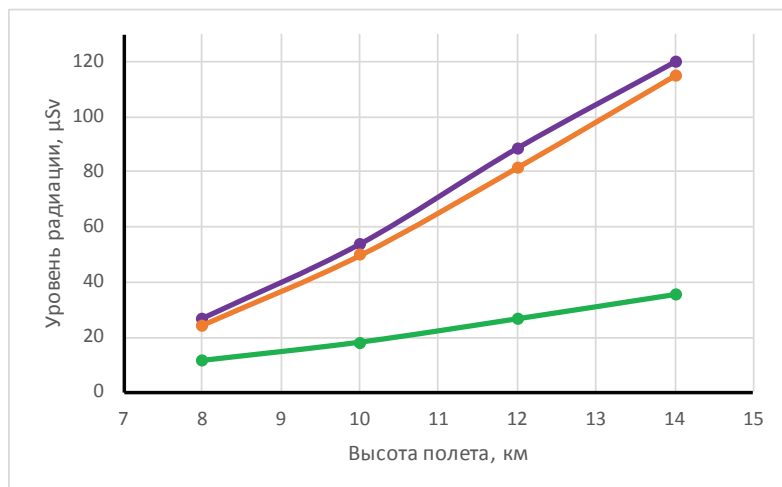


Рис. 7. Зависимость уровня радиации от высоты полета и широты.

1 — маршрут полета Анкоридж-Мурманск, 2 — маршрут полета Казань-Хабаровск, 3 — маршрут полета Дубай-Гуанчжоу.

Fig. 7. Dependence of radiation level on flight altitude and latitude.

1 — Anchorage-Murmansk flight route, 2 — Kazan-Khabarovsk flight route, 3 — Dubai-Guangzhou flight route.

находящимся в радиационном поясе, они порождают вторичные и третичные высокоэнергичные элементы, которые и создают основную опасность для летных экипажей и электроники [19—21, 29, 30].

Исследования проводились на основе модели от ИПГ им. Е. К. Фёдорова для трех маршрутов продолжительностью 6,5 часов и расстоянием около 5800 км. Для трансполярного маршрута Анкоридж-Мурманск максимальная доза радиации при максимальной солнечной активности достигла значений 120,22  $\mu\text{Sv}$ ; для маршрута Казань-Хабаровск — 115,27  $\mu\text{Sv}$ ; для рейса Дубай-Гуанчжоу — 35,67  $\mu\text{Sv}$ . Это не критическая для здоровья доза радиации, однако при совершении восьми перелетов по двум первым маршрутам экипаж получит годовую предельную дозу. Для полета в экваториальных широтах доза радиации крайне мала и не считается опасной. Также были проведены исследования дозы радиации по высотам над Землей (рис. 7). Очевидно, что чем ближе к полярным шапкам, тем выше радиационная опасность, и чем выше эшелон полета, тем больше вероятность облучения экипажа [21, 26—30].

### Заключение

В работе показано, что космическая погода — опасное явление, затрагивающее не только спутниковые аппараты, но и воздушные суда и авионику. Также выявлено, что все консультативные сообщения были выпущены в корректное время и корректны по зонам распространения ОГЯ. Консультативные сообщения



о космической погоде чрезвычайно важны для обеспечения безопасности полетов самолетов. Отметим результаты работы.

Одной из целей было создание архива консультативных сообщений, так как на данный момент его нет в открытом доступе. Архив был создан на основе базы данных АМЦ «Пулково» за период с сентября 2020 года по январь 2023 года, всего было зафиксировано 97 консультативных сообщений. На основе архивных данных было установлено, что чаще всего сообщения выпускались на умеренное ухудшение высокочастотной связи (34 %); среди них не было ни одного сообщения о повышенной радиационной опасности. Также чаще всего консультативные сообщения выпускались по Северному полушарию (62 %) и по высоким широтам (40 %).

Другой целью исследования был анализ двадцать пятого цикла солнечной активности. Исходя из минимального количества солнечных пятен, было установлено, что текущий солнечный цикл начался в 2020 году, и его активность будет возрастать вплоть до конца 2025 года. Окончание цикла ожидается в 2033 году. На конец 2022 г. в двадцать пятом цикле наблюдалось 2074 солнечных пятна, 657 солнечных бурь класса С, 36 солнечных бурь класса М, 2 солнечных бури Х-класса. В текущем 2023 году прогнозируется 136 солнечных пятен, 224 бури класса С, 39 бурь класса М, 3 бури класса Х. Также в двадцать пятом солнечном цикле уже наблюдалось 77 геомагнитных бурь G1-класса, 13 бурь G2-класса, 3 бури G3-класса, 1 буря G4-класса (в 2021 году). Буря класса G5 не наблюдалось.

В качестве примеров влияния космической погоды на ухудшение высокочастотной связи были приведены выпущенные консультативные сообщения за период 3—4 ноября 2021 г. Сильная геомагнитная буря наблюдалась в полярных шапках, затем она распространилась по всему Северному полушарию, что было связано с мощными солнечными вспышками. Данное опасное гелиогеофизическое явление подтвердилось моделью ионосферы GAMBIT.

Опасность неполадок в спутниковой навигации было подтверждено консультативными сообщениями за период 11—12 октября 2021 года. Геомагнитная суббуря локально наблюдалась в некоторых регионах Северного полушария, что было подтверждено данными с приемника Septentrio PolaRx5, установленного в Апатитах.

Так как на период исследования не было выпущено ни одного консультативного сообщения о радиационной опасности, анализ проводился на основании метода расчета уровня радиации от Института прикладной геофизики им. Е. К. Фёдорова. Было доказано, что уровень радиации возрастает с высотой, а также по мере движения от экватора к полярным шапкам. Кроме того, чем сильнее солнечная активность, тем выше опасность уровня радиации.

В заключение несколько рекомендаций для удобства донесения информации авиационным пользователям: например, необходима визуализация границ зон, для которых действует предупреждение, так как в нынешнем виде сообщения не расширяются. Также для Российской Федерации рекомендуется расширить сеть наземной и спутниковой аппаратуры для мониторинга за космической погодой, увеличить количество датчиков для северных регионов, как наиболее

подверженных влиянию геомагнитных бурь, а также технологически осовременить уже имеющиеся. Поскольку ИПГ им. Е. К. Фёдорова, представляющий Россию в региональном центре, является вспомогательным центром и не выпускает консультативные сообщения, желательно усовершенствовать методы прогнозов ОГЯ.

### Список литературы

1. Соколова А. П., Волобуева О. В. Методы и средства наблюдений за космической погодой и ее влияние на полеты воздушных судов / Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 2022. С. 409—417.
2. Буров В. А., Лапшин В. Б., Сыроешкин А. В. Космическая погода и авиаперевозки // Мир измерений. 2013. № 2. С. 11—16.
3. Тлатов А. Г., Тертышников А. В. Прогнозирование параметров космической погоды на основе данных наземных наблюдений солнечной активности / Гелиогеофизические исследования в Арктике. Труды второй всероссийской конференции, Мурманск. 2018. С. 94—97. doi: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.94-97.
4. Жеребцов Г. А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, №. 2. С. 6—18.
5. Бернгардт О. И. Влияние факторов космической погоды на работу радиосредств // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, №. 3. С. 40—60. doi: 10.12737/szf-33201705.
6. Дёминов М. Г., Осипов Ю. С. Ионосфера / Большая российская энциклопедия. М.: 2004-2017. 350 с.
7. Мальцева О. А., Безвытный С. А., Морозов В. Е. и др. Элементы прогнозирования космической погоды и параметров ионосферы / Материалы 12-ой международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса». 2018. С. 344—350.
8. Basu S., Groves K. M., Sultan P. J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans // Journal of Atmosph. Solar-Terr. Phys., Vol. 64, 2002. P. 1745—1754.
9. Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 479 с.
10. Белаховский В. Б., Будников П. А., Пильгаев С. В. и др. Влияние ионосферных возмущений на сцинтилляции ГЛОНАСС/GPS сигналов в авроральных широтах. / «Physics of Auroral Phenomena». Апатиты. 2022. С. 106—109. doi: 10.51981/2588-0039.2022.45.025.
11. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем // Солнечно-земная физика. 2021. Т.7, №. 2. С. 30—52. doi: 10.12737/szf-72202104.
12. Сидоров А. С. Исследование влияния состояния нижних слоев атмосферы и космической погоды на помехоустойчивость радионавигационных сигналов GPS/ГЛОНАСС / VIII Международная научно-практическая конференция «Научный поиск в современном мире». Махачкала: ООО «Апробация», 2015. С. 45—48.
13. Демидов М. Л. О возможностях и проблемах наблюдений магнитных полей Солнца для прогноза космической погоды // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 1. С. 22—33. doi: 10.12737/23279.
14. Куражковская Н. А. Глобальная возмущенность магнитосферы земли и ее связь с космической погодой // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 1. С. 51—62. doi: 10.12737/szf-61202005.
15. Маурчев Е. А., Германенко А. В., Михалко Е. А. и др. Оценка вклада протонов солнечных космических лучей в скорость ионизации вещества атмосферы Земли и сравнение расчётных высотных профилей с экспериментальными данными для случаев высокой солнечной активности / Фундаментальные и прикладные космические исследования. XVI конференция молодых ученых : сборник трудов. Серия «Механика, управление и информатика». Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2019. С. 103—113. doi: 10.21046/KMU-2019-103-113.

16. Рябева Е. В., Идалов В. А., Миноягареев В. Т. и др. Контроль дозы и спектра нейтронов на высотах авиаперелетов // Гелиогеофизические исследования. 2020. № 25. С. 37—44.
17. Стожков Ю. И. Космические лучи в земной атмосфере / Науки о Земле. 2015. С. 15—29.
18. Hammer G. P., Blettner M., Langner I. Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up // Eur. J. Epidemiol. 2012. V. 27. P. 419—429.
19. Takada M., Nunomiya T., Ishikura T. Measuring cosmic-ray exposure in aircraft using real-time personal dosimeters // Radiat Prot Dosimetry. 2012. V. 149. P. 169—176.
20. Mares, V., Maczka, T., Leuthold, G. Rühm, W. Air crew dosimetry with a new version of EPCARD // Radiat. Prot. Dosim. 2009. V. 136, P. 262—266.
21. Yasuda H., Lee J., Yajima K. Measurement of cosmic-ray neutron dose onboard a polar route flight from New York to Seoul // Radiat Prot. Dosimetry. 2011. V. 146. P. 213—216.
22. Алексеев Н. В. Происхождение солнечных циклов / Евразийское научное объединение. 2018. № 8. С. 32—36.
23. Зверев А. С., Григорьев В. Г., Стародубцев С. А. и др. Мониторинг геомагнитных возмущений по данным наземных наблюдений космических лучей в начале 25-го цикла солнечной активности / Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2022. С. 49—51.
24. Калинин М. С., Базилевская Г. А., Крайнев М. Б. и др. Особенности временного хода интенсивности галактических космических лучей в минимуме между 24 и 25 солнечными циклами / Physics of Auroral Phenomena. 2019. С. 122—125. doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.122-125.
25. Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т.8. № 1. С. 5—36.
26. Витинский Ю. И., Колецкий М., Куклин Г. В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. М.: Наука, 1986. 201 с.
27. F. Quiñonez, L. A. Núñez, E. A. Casallas. Radiation Dose Charts for Long Geodetic and Polar Flights with CARI-7A. 2019. P. 20.
28. Янчуковский В. Л., Белинская А. Ю. Геофизические явления в период всплеска солнечной активности в октябре-ноябре 2021 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 297—301. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-297-301.
29. Козелов Б. В. Статистика измерения радиации в атмосфере на высотах рейсовых самолетов в 2017-2018 годах / Physics of Auroral Phenomena. Апатиты. 2019. С. 126—129. doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.126-129.
30. Морозова М. А., Лапшин В. Б., Доренский С. В. и др. Дозиметрия при авиаперелётах // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 10. С. 45—92.

## References

1. Sokolina A. P., Volobueva O. V. Methods and means of observing space weather and its impact on aircraft flights. Materials In the All-Russian scientific-practical conference “Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia.”, 2022:(409—417). (In Russ.).
2. Burov V. A., Lapshin V. B., Syroeshkin A. V. Space weather and air travel. *Mir izmerenij = The world of measurements*. 2013; (2):(11—16). (In Russ.).
3. Tlatov A. G., Tertyshnikov A. V. Prediction of space weather parameters based on data from ground-based observations of solar activity. Proceedings of the second all-Russian conference, 2018:(94—97). (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.94-97.
4. Zherebcov G. A. Complex of new generation heliogeophysical instruments. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2020; (2):(6—18). (In Russ.).
5. Bergardt O. I. Influence of space weather factors on the operation of radio facilities. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*, 2017; (3):(40—60). (In Russ.). doi: 10.12737/szf-33201705.
6. Dyominov M. G., Osipov Y. S. *Ionosfera = Ionosphere*. Moscow: Great Russian Encyclopedia, 2004-2017: 350 p. (In Russ.).
7. Mal'ceva O. A., Bezvytnyj S. A., Morozov V. E. Elements of forecasting space weather and ionospheric parameters. Materials of the 12th International School-Conference “Problems of Geocosmos”, 2018: (344—350). (In Russ.).

8. Basu S., Groves K. M., Sultan P. J. Specification and forecasting of scintillations in communication/navigation links: Current status and future plans. *Journal of Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2002; (64): 1745—1754.
9. Afrajmovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verhnej atmosfery Zemli = GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere*. Irkutsk: Russian Academy of Medical Sciences, 2006: 479 p. (In Russ.).
10. Belahovskij V. B., Budnikov P. A., Pil'gaev S. V. Effect of ionospheric disturbances on GLONASS/GPS signal scintillations at auroral latitudes. *Physics of Auroral Phenomena*. 2022; (106—109). (In Russ.). doi: 10.51981/2588-0039.2022.45.025.
11. Dem'yanov V. V., Yasyukevich Y. V. Space weather: risk factors for global navigation satellite systems. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2021; (2):(30—52). (In Russ.). doi: 10.12737/szf-72202104.
12. Sidorov A. S. Study of the Influence of the State of the Lower Atmosphere and Space Weather on the Noise Immunity of GPS/GLONASS Radio Navigation Signals. *VIII ISPC "Scientific search in the modern world"*. Makhachkala: LLC "Aprobatsiya", 2015:(45—48). (In Russ.).
13. Demidov M. L. On the Possibilities and Problems of Observing the Solar Magnetic Fields for Space Weather Forecasting. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2017; (1):(22—33). (In Russ.). doi: 10.12737/23279.
14. Kurazhkovskaya N. A. Global perturbation of the earth's magnetosphere and its relationship with space weather. *Solnechno-zemnaya fizika = Solar-terrestrial physics*. 2020; (1):(51—62). (In Russ.). doi: 10.12737/szf-61202005.
15. Maurchev E. A., Germanenko A. V., Mihalko E. A. Estimation of the contribution of solar cosmic ray protons to the ionization rate of the matter of the Earth's atmosphere and comparison of the calculated altitude profiles with experimental data for cases of high solar activity. *Fundamental and applied space research. XVI Conference of young scientists : collection of works. The series "Mechanics, management and Computer Science"*. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2019:(103—113). (In Russ.). doi: 10.21046/KMU-2019-103-113.
16. Ryabeva E. V., Idalov V. A., Minoyagareev V. T. Dose and neutron spectrum monitoring at air travel altitudes. *Geliogeofizicheskie issledovaniya = Heliogeophysical research*. 2020; (25):(37—44). (In Russ.).
17. Stozhkov Y. I. Cosmic rays in the earth's atmosphere. *Earth Sciences*, 2015:(15—29). (In Russ.).
18. Hammer G. P., Blettner M., Langner I. Cosmic radiation and mortality from cancer among male German airline pilots: extended cohort follow-up. *Eur. J. Epidemiol.* 2012; (27): 419—429.
19. Takada M., Nunomiya T., Ishikura T. Measuring cosmic-ray exposure in aircraft using real-time personal dosimeters. *Radiat Prot Dosimetry*. 2012; (149): 169—176.
20. Mares, V., Maczka, T., Leuthold, G. Rühm, W. Air crew dosimetry with a new version of EPCARD. *Radiat. Prot. Dosim.* 2009; (136): 262—266.
21. Yasuda H., Lee J., Yajima K. Measurement of cosmic-ray neutron dose onboard a polar route flight from New York to Seoul. *Radiat Prot. Dosimetry*. 2011; (146): 213—216.
22. Alekseev N. V. Origin of solar cycles. *Evrazijskoe nauchnoe ob'edinenie = Eurasian scientific association*. 2018; (8):(32—36). (In Russ.).
23. Zverev A. S., Grigor'ev V. G., Starodubcev S. A. Monitoring of geomagnetic disturbances based on ground-based observations of cosmic rays at the beginning of the 25th cycle of solar activity. *Astrophysics and physics of the Sun*. 2022:(49—51). (In Russ.).
24. Kalinin M. S., Bazilevskaya G. A., Krajenev M. B. Peculiarities of the Time Variation of the Intensity of Galactic Cosmic Rays at the Minimum between 24th and 25th Solar Cycles. *Physics of Auroral Phenomena*. 2019:(122—125). (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.122-125.
25. Ermolaev Y. I., Ermolaev M. Y. Solar and interplanetary sources of geomagnetic storms: aspects of space weather. *Geofizicheskie processy i biosfera = Geophysical processes and biosphere*. 2009; (1):(5—36). (In Russ.).
26. Vitinskij YU. I., Kopeckij M., Kuklin G. V. *Statistika pyatnoobrazovatel'noj deyatel'nosti Solnca = Statistics of sunspot activity*. Moscow: Nauka, 1986: 201 p. (In Russ.).
27. F. Quiñonez, L. A. N'úñez, E. A. Casallas. Radiation Dose Charts for Long Geodetic and Polar Flights with CARI-7A. 2019: 20.
28. Yanchukovskij V. L., Belinskaya A. Y. Geophysical phenomena during a burst of solar activity in October-November 2021. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa =*

*Modern problems of remote sensing of the Earth from space.* 2022; (19):(297—301). (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-297-301.

29. Kozelov B. V. Statistics of radiation measurement in the atmosphere at the heights of regular aircraft in 2017-2018. *Physics of Auroral Phenomena.* 2019;(126—129). (In Russ.). doi: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.126-129.
30. Morozova M. A. Lapshin V. B., Dorenskiy S. V. Dosimetry during air travel. *Geliogeofizicheskie issledovaniya = Heliogeophysical research.* 2014; (10):(45—92). (In Russ.).

### **Информация об авторах**

*Анастасия Павловна Соколина*, синоптик Северо-Западный филиал ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета», nst.palna@yandex.ru.

*Ольга Васильевна Волобуева*, канд. геогр. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, ovvolobueva@rshu.ru.

*Яна Викторовна Дробжева*, д-р физ.-мат. наук, доцент, декан метеорологического факультета, Российский государственный гидрометеорологический университет, ydrobzheva@mail.ru.

*Ирина Александровна Иванова*, ассистент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, ira.nova@mail.ru.

*Ирина Викторовна Лаврова*, канд. геогр. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, livspb@yandex.ru.

*Ольга Николаевна Топтунова*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры метеорологических прогнозов, Российский государственный гидрометеорологический университет, olgakolp@yandex.ru.

### **Information about authors**

*Anastasia Pavlovna Sokolina*, weather forecaster, North-Western branch of the Federal State Budgetary Institution “Aviametelecom of Roshydromet”, St. Petersburg, nst.palna@yandex.ru.

*Olga Vasiliievna Volobueva*, PhD in Geography, Associate Professor of Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, ovvolobueva@rshu.ru.

*Yana Viktorovna Drobzheva*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Dean of Faculty of Meteorology, Russian State Hydrometeorological University, ydrobzheva@mail.ru.

*Irina Alexandrovna Ivanova*, Assistant of Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, ira.nova@mail.ru.

*Irina Victorovna Lavrova*, PhD in Geography, Associate Professor of Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, livspb@yandex.ru.

*Olga Nikolaevna Topunova*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of Department of Meteorological Forecasts, Russian State Hydrometeorological University, olgakolp@yandex.ru.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 23.04.2023*

*Принята к печати после доработки 15.08.2023*

*The article was received on 23.04.2023*

*The article was accepted after revision on 15.08.2023*