

Влияние опасных явлений космической погоды на технические средства и системы

ISSN 1996-8493
DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77
© Технологии гражданской безопасности, 2023

В.Т. Минлигареев, Д.Д. Вишняков, Е.Д. Виноградова, А.С. Калишин

Аннотация

В работе рассмотрены опасные явления космической погоды (опасные гелиогеофизические явления), влияние их на технические средства и системы, включая: космические аппараты; технические средства навигации, связи, электроэнергетики; радиационную безопасность при авиаперелетах; эксплуатацию трубопроводов и др. Описаны пути снижения влияния космической погоды на технические средства и системы, основанные на решении задач получения оперативной априорной информации о таких воздействиях и предупреждения соответствующих служб заинтересованных организаций, министерств и ведомств о надвигающихся угрозах.

Ключевые слова: космическая погода; опасные гелиогеофизические явления; факторы; околоземное космическое пространство; магнитосфера; ионосфера; информационное обеспечение; технические средства и системы.

Space Weather Hazards Impact on Technical Means and Systems

ISSN 1996-8493
DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77
© Civil Security Technology, 2023

V. Minligareev, D. Vishniakov, E. Vinogradova, A. Kalishin

Abstract

The paper considers dangerous space weather phenomena (dangerous heliogeophysical phenomena), their impact on technical means and systems, including spacecraft, technical means of navigation, communication, electric power, radiation safety during air travel, pipeline operation, etc. The ways of reducing impact of space weather on technical means and systems based on solving the problems of obtaining operational priori information about such impacts and warning the relevant services of interested organizations, ministries and departments about impending threats are described.

Key words: space weather; dangerous heliogeophysical phenomena; factors; outer space; magnetosphere; ionosphere; information support; technical means and systems.

20.07.2023

Околоземное космическое пространство (ОКП) находится под постоянным воздействием «солнечного ветра» — потоков плазмы, непрерывно излучаемой Солнцем. Изменения параметров солнечного ветра генерируют в земной магнитосфере комплекс процессов, называемых «космической погодой», которые могут оказывать негативное влияние на процессы жизнедеятельности человека. Подобные явления космической погоды иначе называют опасными гелиогеофизическими явлениями (ОГЯ).

В РФ за диагностику и прогнозы ОГЯ отвечает Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) Минприроды. Научно-методическими организациями, ведущими это направление, являются Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова (ФГБУ «ИПГ») и Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ФГБУ «ААНИИ»).

Под термином «космическая погода» понимается совокупность гелиогеофизических явлений и процессов на Солнце, в межпланетном и ОКП, магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли. ОГЯ могут оказывать сильное воздействие на функционирование различных технических средств, систем радиосвязи, радиолокации и навигации, протекание физико-химических и биологических процессов. Сам термин «космическая погода» в российскую науку ввел в 70-х годах XX века академик Евгений Константинович Федоров, геофизик, «папанинец», участник первой дрейфующей станции СП-1.

Первичным источником возмущений являются вариации солнечного излучения, а перенос возмущений осуществляется волнами и частицами в межпланетной среде, магнитосфере и ионосфере Земли. Прежде всего эти возмущения сказываются на тех процессах, в которых существенную роль играет установившееся равновесие электрических токов и магнитных полей. Возмущения, нарушающие это равновесие, могут привести к возникновению различных нештатных ситуаций [1].

ОГЯ оказывают определенное воздействие на широкую сферу деятельности человека. Солнечные, галактические и магнитосферные энергичные частицы создают радиационную опасность. Сильные авроральные токи в период геомагнитных бурь могут разрушить или повредить линии электропередачи, вызвать повышенную коррозию нефте- и газопроводов. Ионосферные неоднородности, порожденные магнитной бурей, влияют на радиосвязь и навигационные сигналы как наземных систем, так и спутников ГНСС, нарушая их работу. События поглощения радиоволн в полярной шапке во время протонных вспышек на Солнце и магнитных бурь могут приводить к ослаблению, а во время мощных событий — к полному прекращению радиосвязи в различных частотных диапазонах, сбоям в радиолокации (рис. 1) [2]. Облучение спутников высокоэнергичными частицами может вызвать аномалии в их работе, разрушить важные элементы электроники; привести к деградации солнечных батарей и «слепоте» оптических систем как телескопов, так и звездных датчиков ориентации.

Учет этих факторов, прогнозирование и парирование их негативного воздействия, оперативное информационное сопровождение при возникновении опасных явлений космической погоды становятся необходимой составной частью обеспечения национальной безопасности страны.

Космическая погода создает опасность для человека и его деятельности, порождая многочисленные риски и потери, связанные с выходом из строя и прекращением функционирования технических средств и систем.

Начиная с события Керрингтона 1859 г., идет отсчет влияния космической погоды на технические средства и системы. Солнечный супершторм вылился в огромный двойной выброс корональных масс и достиг Земли 1 сентября. Индекс геомагнитной активности Dst был на уровне 900 нТл. Радиационные пояса, окружающие Землю, на время оказались сорванными, огромная масса электронов и протонов была вброшена в верхние слои атмосферы, что придало полярному сиянию интенсивный красный оттенок. В результате 1 и 2 сентября 1859 года отказала вся телеграфная система в Северной Америке и в Европе. Искрились линии электропередачи, спонтанно возгоралась телеграфная бумага, а некоторые технические устройства продолжали свою работу, будучи уже отключенными от источника питания. Полярное сияние наблюдали жители всей планеты, даже над Карибским бассейном.

Произожди такое событие в наши дни, то последствия были бы куда катастрофичнее для мировой экономики: сбой радиосвязи, континентальные отключения электроэнергии, проблемы со спутниковой навигацией планетарного значения, переоблучение экипажей и пассажиров на высотах авиaperелетов. Это схоже с разрушениями мощного урагана или небывалой мощи землетрясения. Восстановление всех повреждений заняло бы долгие годы в планетарном масштабе. В XX веке подобные явления в меньшем масштабе проявлялись с начала 30-х годов и связаны в первую очередь с развитием средств связи.

Современные события говорят об учащении случаев сбоев и выхода из строя технических средств и систем на пиках 11-летних циклов солнечной активности. Так, 10–11 января 1997 г. в северной Канаде пришлось почти на сутки отменить полеты пассажирских самолетов из-за неполадок с радиосвязью. 24 марта 1991 г. произошли крупная авария в Нью-Йорке и одновременные сбои электроснабжения в Финляндии вследствие возникновения наводимых индукционных полей и больших перегрузок (до нескольких сотен ампер) в длинных линиях электропередачи (особенно вытянутых вдоль параллелей).

Интенсивные мелкомасштабные ионосферные неоднородности могут приводить к сильным амплитудным и фазовым мерцаниям сигнала GPS, вызывая потерю фазы сигнала и приводя к невозможности осуществления высокоточной навигации. Размер таких неоднородностей имеет порядок первой зоны Френеля: 150–300 м — для частот GPS f_1 и f_2 . Было подтверждено, что основной причиной сбоев является рассеяние сигнала при распространении через область

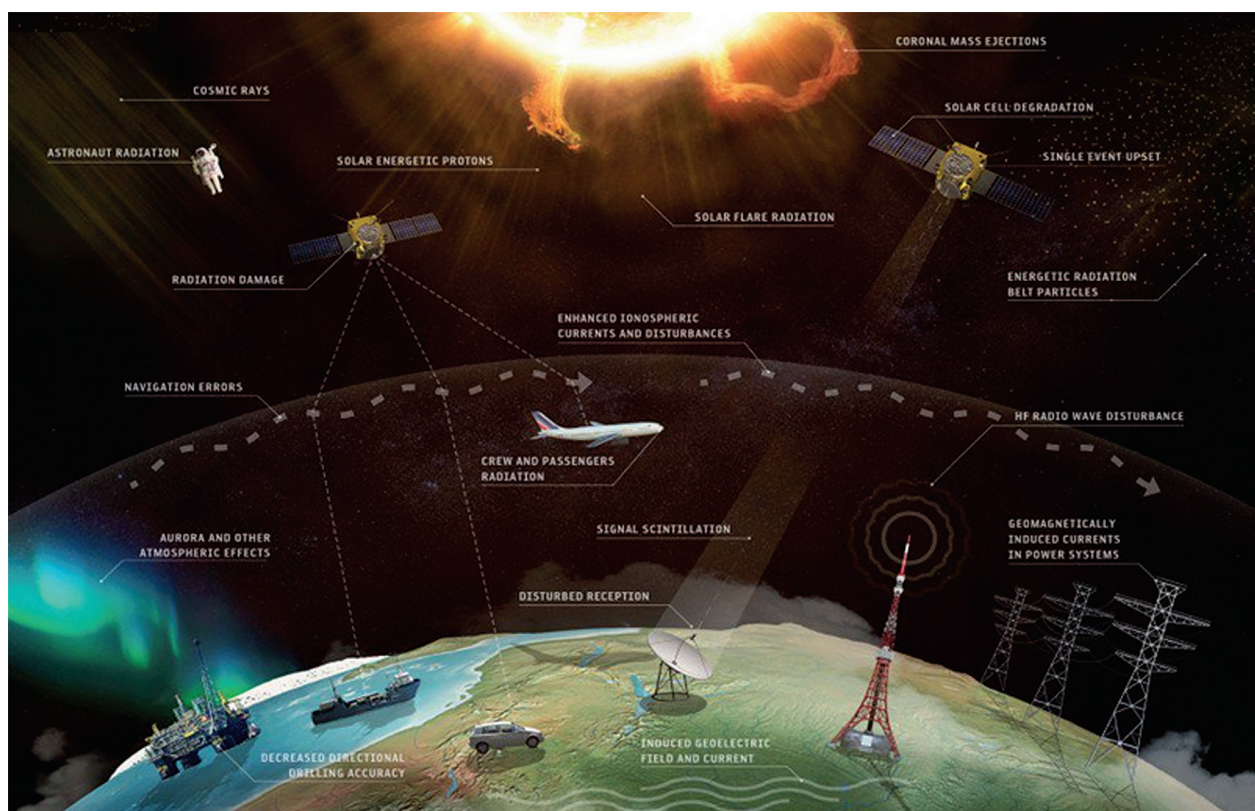


Рис. 1. Иллюстрация влияния факторов космической погоды на технические средства и системы (https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/11/Space_weather_effects)

с интенсивными мелкомасштабными ионосферными неоднородностями, и показано, что фазовые сбои на вспомогательной частоте регистрируются чаще, чем на основной частоте. При этом фазовые сбои сопровождаются экваториальной границей аврорального овала при его расширении во время магнитных бурь. Установлено, что на фронтах интенсивных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) аврорального происхождения могут генерироваться мелкомасштабные неоднородности, вызывающие сбои фазовых измерений. Выявлена взаимосвязь между сбоями в системе GPS и интенсивностью солнечного радиоизлучения и показано, что амплитуда широкополосного радиоизлучения во время мощных солнечных вспышек может быть сравнима с амплитудой сигналов спутниковых систем навигации. Это приводит к многочисленным сбоям в работе приемников, вплоть до полной потери сигнала со спутников. Показано, что вероятность регистрации фазовых сбоев зависит от угла между радиолучом «спутник-приемник» и магнитным полем Земли. Это связано с присутствием крупномасштабных магнитоориентированных неоднородностей [3].

С началом космической эры и с открытием радиационных поясов накоплена значительная статистическая информация, свидетельствующая о наличии многочисленных фактов временной или безвозвратной потери работоспособности космических аппаратов (КА). В ходе анализа выборки около 3000 аномальных состояний спутников в период с 1971 по 1989 год было подсчитано, что до четверти всех сбоев в работе КА было вызвано состоянием космической погоды. Для КА

самой известной катастрофой стал внезапный выход из строя американского телевизионного ретранслятора TELSTAR-401A 10 января 1997 г. Целой серией нарушений в работе бортовых систем (в частности, на научном спутнике Polar) и даже выходом из строя (научный спутник Equator-S и коммуникационный спутник Galaxy 4) ознаменовался приход к Земле магнитной бури 1–4 мая 1998 года.

Недавние события с микроспутниками подтверждают полученную статистику. 8 февраля 2022 года SpaceX потеряла 40 из 49 недавно запущенных спутников Starlink. Они не вышли на рабочую орбиту из-за солнечной вспышки, поскольку поток солнечного ветра вызвал резкое увеличение плотности атмосферных слоев. Спутники разрушились и сгорели в атмосфере.

Одними из самых опасных факторов космической погоды для аппаратуры КА в настоящее время считаются электроны релятивистской энергии ($E > 500$ кэВ), потоки которых могут резко возрастать в диапазоне расстояний всего внешнего радиационного пояса Земли. Резкий подъем потока релятивистских магнитосферных электронов вызывает серьезные аномалии в работе КА, в связи с чем эти электроны даже получили название «электроны-убийцы» (killer-electrons). Например, в мае 1994 г. несколько геостационарных спутников (ANIK-1,-2, INTELSAT-K) было потеряно, а в мае 1998 г. возникли серьезные проблемы с работой электронной аппаратуры на борту КА Equator-S, Polar, Galaxy-4 в результате увеличения интенсивности потоков релятивистских электронов. Частота отказов на КА резко возрастает в период максимальных потоков

релятивистских электронов в магнитосфере на фоне высокоскоростных потоков солнечного ветра вблизи минимума солнечной активности [4].

Кроме высокоэнергичных электронов радиационные пояса заполнены потоками электронов с энергией десятки-сотни тысяч электрон-вольт (эВ). Потоки этих частиц могут возрастать очень сильно (2–5 порядков) во время геомагнитных бурь и суббурь. Электроны с энергией ~ 10–100 кэВ проникают в диэлектрик (обшивку или элементы, находящиеся на поверхности аппарата) на глубину до 10–20 мкм, создавая разность потенциалов между частями КА с последующим пробоем. Наиболее сильные события на Солнце приводят к резкому возрастанию потоков протонов с энергией в несколько МэВ внутри магнитосферы, которое может сохраняться продолжительное время, приводя к формированию дополнительных протонных поясов [5].

Еще один фактор — космические лучи. Солнечные космические лучи (СКЛ), в основном это протоны и ионы гелия, возникают во время солнечных вспышек и выброса корональных масс. Обычно энергия ускоренных частиц не превышает 50 МэВ — для протонов и 1 МэВ для электронов [6].

Инжекция СКЛ может носить как импульсный, так и длительный характер; известны случаи, когда значительные потоки СКЛ регистрировались в течение суток. После сильных солнечных вспышек потоки протонов и тяжелых ядер возрастают на несколько порядков и вызывают «ослепление» и потерю ориентации межпланетных и геостационарных КА [7].

По мере увеличения космических группировок проявлялось влияние состояния солнечной активности

и параметров ионосферы Земли на функциональные характеристики КА различного назначения. Установлено, что на эффективность решения задач в космосе в значительной степени оказывает влияние космическая погода. Для КА это прежде всего выражается в следующем (рис. 2):

появление «фальшивых» звезд, вызывающее сбои систем астроориентации;

снижение мощности солнечных панелей, повреждение поверхности КА после воздействия на него космической радиации;

сбои микроэлектроники, снижение срока эксплуатации элементов питания электронного оборудования после получения большой дозы радиации;

появление дугового разряда на солнечных панелях; возникновение электромагнитных импульсов от разрядов на тонкой экранированной поверхности КА или глубоко внутри него;

накопление радиации в компонентах КА.

Воздействие солнечного ветра и магнитных бурь негативно влияет не только на работоспособность аппаратуры КА. Состояние космической погоды оказывает отрицательное влияние и на наземную инфраструктуру.

Таким образом, проанализировав перечисленные случаи влияния космической погоды на технические средства, однозначно можно выделить необходимость прогнозирования и мониторинга ОГЯ, своевременного информационного обеспечения населения и организаций при возникновении опасных явлений космической погоды, а также уделить особое внимание консолидированному учету влияния факторов космической погоды.



Рис. 2. Влияние космической погоды на космические аппараты

Проблема информационного оповещения об ОГЯ оказывается тесно связанной с широким кругом задач различного значения в Арктической зоне, наиболее подверженной воздействию магнитных бурь и других последствий солнечной активности.

В Российской Федерации создана система мониторинга геофизической обстановки, которая входит в наблюдательную сеть Росгидромета. Геофизическая информация с наблюдательных платформ передается в аналитические центры ФГБУ «ИППГ» [8] и ФГБУ «ААНИИ» [9]:

с наземного сегмента — с ионосферных станций, магнитных обсерваторий, ГНСС-приемников, солнечных и радиотелескопов;

с космических аппаратов — от бортовых гелиогеофизических комплексов, установленных на КА серий: «Метеор-М», «Электро-Л», «Арктика-М», а также с перспективного геофизического КА «Ионосфера»;

с международных каналов обмена гелиогеофизической информацией.

В информационно-аналитические центры ФГБУ «ИППГ» и ФГБУ «ААНИИ» поступает оперативная информация с различных средств мониторинга состояния космической погоды, расположенных как на поверхности Земли, так и размещенных на космических аппаратах. После обработки поступающей информации оповещения об ОГЯ передаются более чем в 200 организаций федеральных органов исполнительной власти и зарубежных организаций.

Пути снижения влияния космической погоды на технические средства и системы прежде всего связаны с решением задачи получения оперативной априорной информации о таких воздействиях и предупреждения соответствующих служб заинтересованных организаций, министерств и ведомств о надвигающихся угрозах. Особенно важным и актуальным становится решение этой задачи в преддверии очередного максимума 25-го цикла солнечной активности, который ожидается в середине 2025 года [10].

Литература

1. Буров В.А. Временный инструктивный материал по космической погоде. М., 2019.
2. Space weather effects. European Space Agency // URL: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2017/11/Space_weather_effects (дата обращения: 02.02.2023).
3. Ledvina B.M. Temporal properties of intense GPS L1 amplitude scintillations at midlatitudes / B.M. Ledvina, P.M. Kintner, J.J. Makela // Radio Science. 2004. Vol. 39(1). P. RS1S18. DOI: 10.1029/2002RS002832.
4. Wilkinson D.C. NOAA's spacecraft anomaly database and examples of solar activity affecting spacecraft / D.C. Wilkinson // Journal of Spacecraft and Rockets. 1991. Vol. 31. P. 160–165.
5. Lorentzen K.R. Multisatellite observations of MeV ion injections during storms / K.R. Lorentzen, J.E. Mazur, M.D. Looper et. al. // Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 107(A9). DOI:10.1029/2001JA000276.
6. Гвишиани А.Д. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца. М.: РАН, 2019. 186 с.: ил.
7. Кузнецов Н.В. Радиационные одиночные сбои микроэлектроники космических аппаратов, обусловленные событиями солнечных космических лучей / Н.В. Кузнецов, Р.А. Ныммик // Космические исследования. 1997. Т. 35. № 5. С. 465–479.
8. Минлигареев В. Т., Репин А. Ю., Хотенко Е. Н. и др. Влияние космической погоды на технические средства и системы // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Метрология в радиоэлектронике» Материалы конференции. Менделеево, 19–21 июня 2018 г. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. Т. 1. С. 44–46.
9. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Трошичев О.А., Франк-Каменецкий А.В. Геофизические исследования в высоких широтах // Вестник РФФИ. 2020. № 3–4. С. 60–78.
10. Space weather prediction center national oceanic and atmospheric administrationsolar cycle progression //URL: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> (дата обращения: 02.02.2023).

Сведения об авторах

Минлигареев Владимир Тимурович: д. т. н., Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, зам. директора по научной работе. Москва, Россия. SPIN-код: 9709-7919.

Вишняков Дмитрий Дмитриевич: аспирант МГУ имени М.В. Ломоносова; Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, инженер 1 категории. Москва, Россия. SPIN -код: 8354-0315.

Виноградова Екатерина Дмитриевна: Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, инженер 1 категории. Москва, Россия.

Калишин Алексей Сергеевич: к.т.н., Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, руковод. отд. геофизики. Санкт-Петербург, Россия.

Information about authors

Minligareev Vladimir T.: ScD (Technical Sc.), Institute of Applied Geophysics named after Academician E. K. Fedorov, Deputy Director for Research. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 9709-7919.

Vishnyakov Dmitry D.: Postgraduate Student at Lomonosov Moscow State University; Institute of Applied Geophysics named after Academician E. K. Fedorov, Engineer of 1 Category. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 8354-0315.

Vinogradova Ekaterina D.: Institute of Applied Geophysics named after Academician E. K. Fedorov, Engineer of 1 Category. Moscow, Russia.

Kalishin Alexey S.: PhD (Technical Sc.), Arctic and Antarctic Research Institute, Head of Geophysics Department. St. Petersburg, Russia.