

УДК 537.862

ЧТО ТАКОЕ КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КАКОЕ НАМ ДО НЕЕ ДЕЛО?

© 2025 г. В. А. Пилипенко^{1, 2, *}¹Геофизический Центр РАН, Москва, Россия²Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

*E-mail: pilipenko_va@mail.ru

Воздействие Солнца на Землю не сводится лишь к тому, что при солнечной вспышке «выбрасывается» поток частиц, который затем «бьет» по нашей планете, а требует выяснения многих фундаментальных физических явлений, без представления о которых солнечно-земные связи не могут быть поняты. В обзоре, нацеленном на неспециалистов в космической физике, обсуждается, что такое космическая погода и для кого, и для чего она может быть опасна. В первую очередь возмущения космической погоды воздействуют на спутниковые и наземные технологические системы, поэтому хотя бы поверхностное представление о механизмах такого воздействия необходимо тем, кто имеет дело с такими системами. Список литературы включает только работы обзорного характера.

Ключевые слова: космическая погода, солнечно-земная физика, магнитосфера, магнитные бури, геоиндуцированные токи.

Для цитирования: Пилипенко В.А. Что такое космическая погода и какое нам до нее дело? // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 3. С. 28–47. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_3_28

Введение

Как Солнце воздействует на электромагнитную «погоду» на Земле?

Бытует такое представление, что геофизика – это как бы «физика более низкого уровня». Предполагается, что настоящие физические открытия делаются на mega-science установках, а геофизики только натягивают установленные физические законы на природные явления. На самом деле природа не знает, что мы ее поделили на разные научные дисциплины, и никто не знает, где удастся увидеть ее принципиально новые грани – в лабораторных экспериментах или при геофизических наблюдениях. Это видно на примере изучения солнечно-земной физики.

Когда говорят о воздействии Солнца на Землю, неявно полагают, что оно заключается в том, что при солнечной вспышке «выбрасывается» поток частиц, который затем «бьет» по нашей планете, и этот «удар» виден как вспышка полярных сияний. Такое упрощенное представление о механизме воздействия Солнца на Землю в свое время, казалось бы, подтвердилось экспериментами с «тереллой» (т.е. маленькой Землей). Электронный пучок посылался на намагниченный шарик, и на нем под действием падающих на него электронов вспыхивали светящиеся кольца, напоминающие полярные сияния (рис. 1). Казалось бы, этот эксперимент наглядно объяснил природу солнечно-земных связей и даже полярных сияний?! Увы, такое объяснение оказалось очень наглядным, но совершенно неверным. На самом деле, солнечно-земные связи включают цепь фундаментальных физических явлений, понимание которых потребовало немало усилий, и многие из которых до конца так и не выяснены.

Как же вариации активности Солнца могут сказаться на нашей жизни? Казалось бы никак, т.к. изменчивость солнечной постоянной – т.е. мощность излучения Солнца в оптическом диапазоне всего ~ 0.01%? Но диапазон солнечного излучения очень широк – от космических лучей (которые нам ионизируют воздух в комнате) до рентгеновских и гамма-вспышек, радиоизлучения, ультрафиолетового излучения (создающего ионосферу) до потоков низкоэнергичных частиц. И во всех этих диапазонах энергий солнечные вариации гораздо сильнее, чем в оптическом диапазоне.

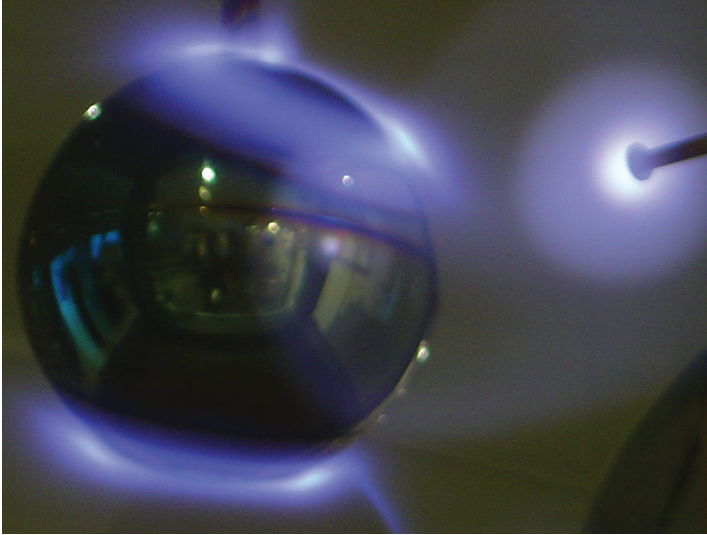


Рис. 1. Эксперимент с намагниченным шариком («тереллой») для объяснения природы солнечно-земных связей и полярных сияний. Светящиеся кольца создаются пучком электронов, падающих на шарик

Рис. 2. Вид короны Солнца при наблюдениях наземным оптическим телескопом во время солнечного затмения



Потоки испускаемых Солнцем частиц мы видим при солнечных затмениях – они образуют солнечную корону (рис. 2). Как далеко расширяется солнечная корона? Ответ на этот вопрос был найден не при оптических наблюдениях, а при теоретических рассуждениях. Толчком к пониманию послужило неожиданное решение сравнительно простой задачи о равновесном состоянии нагретого ($\sim 10^6$ K) газового шара. Стационарное решение оказалось возможным только при нефизическом предположении о ненулевом давлении на бесконечности?! Более того, решение, найденное американским геофизиком Паркером, при учете спадания гравитации с расстоянием показало, что стационарное состояние достигается только при постоянном истечении вещества из шара, т.е. теория предсказала неизбежность образования солнечного ветра. Таким образом, решение Паркера доказало, что мы живем в короне Солнца! Любопытно, что первоначально статья Паркера с этим результатом была отклонена *Astrophysical Journal*, а последнюю спутниковую миссию к Солнцу назвали его именем.

Кроме того, на фоне спокойного солнечного ветра, описываемого решением Паркера, возникают высокоскоростные потоки солнечного вещества (рис. 3):

слева – потоки со скоростью вытекания $\sim$ млн т/с (рекуррентные с 27-дневной повторяемостью) из корональных дыр Солнца, где магнитное поле ослаблено и не удерживает солнечную плазму; справа – корональные выбросы массы (КВМ), которые смогли увидеть только благодаря спутниковым наблюдениям, но механизм формирования которых так и не выяснен. КВМ и солнечные вспышки, дающие всплеск излучений от радиодиапазона до гамма-излучения – это независимые процессы, но они часто происходят вместе. Во время максимумов солнечной активности частота КВМ достигает 3/сутки, тогда как в периоды спокойного Солнца снижается до одного выброса в 5 суток. В КВМ может содержаться до 10 млрд тонн солнечного вещества, которое летит в космосе со скоростью до 1–2 тыс км/с. Энергия такого потока много больше энергии тысячи ядерных бомб. К счастью, КВМ в нас попадает только, если выброс направлен в сторону Земли.

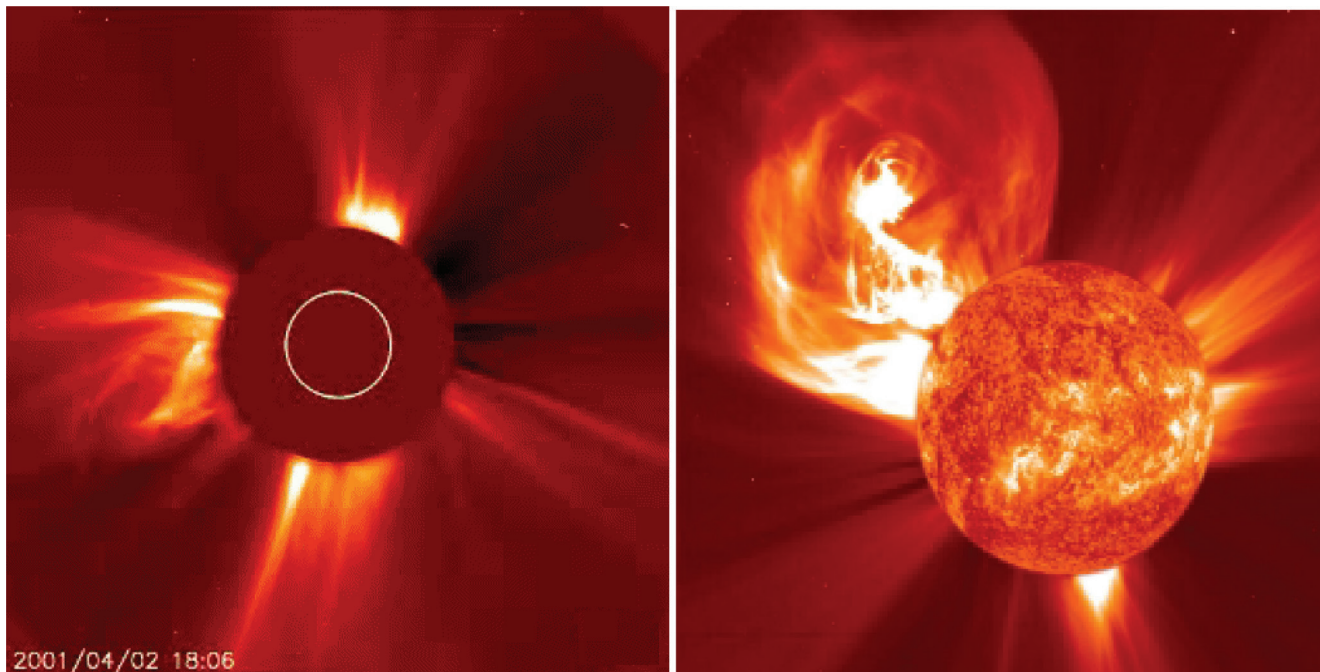


Рис. 3. Высокоскоростные потоки из корональных дыр (слева) и корональный выброс массы (справа) по наблюдениям со спутника АСЕ, находящегося в точке либрации между Землей и Солнцем ($\sim 200 R_E$ от Земли)

Потоки из корональных дыр и КВМ вызывают либо слабые рекуррентные бури (их можно заблаговременно предсказать), либо сильные бури (непредсказуемые). Почему эти заряженные частицы не расталкиваются, и поток не расплывается при движении от Солнца? Потому, что мы здесь сталкиваемся с веществом в качественно новом состоянии – плазмой. Особенности плазмы солнечного ветра в том, что она – бесстолкновительная; низкоэнергичная с энергией частиц $\sim$ сотен эВ, разреженная с плотностью $N \sim 10 \text{ см}^{-3}$ (для сравнения, концентрация молекул в комнате $> 10^{19} \text{ см}^{-3}$), и сверхзвуковая со скоростью V от несколько сотен до первых тыс км/м.

Что будет, когда солнечный ветер 2–3 суток пройдет от Солнца до Земли? Будет идти постепенное сдувание атмосферы, и хотя поток очень разреженный, но за млн лет атмосфера будет потеряна. Это, по-видимому, произошло на Марсе, после того как планета потеряла каким-то образом свое магнитное поле. Но Земле это не грозит, т.к. Земля защищена собственным магнитным полем! Гидромагнитное динамо, работающее в ядре Земли, создает квази-дипольное геомагнитное поле с индукцией $\sim 30000 \text{ нТл}$. Взаимодействие потока плазмы с геомагнитным полем приводит к образованию магнитосферы – полости с границей на 10–15 радиусах Земли R_E , куда проводящая плазма солнечного ветра не проникает (рис. 4).

Как же вариации солнечного ветра или межпланетного магнитного поля (ММП), которое он несет, могут передаться внутрь магнитосферной полости? Диффузия оказывается слишком медленным процессом. Поток солнечного ветра время от времени «ударяет» по магнитосфере, что происходит,

когда межпланетная ударная волна налетает на нее. В этом случае магнитосфера резко поджимается, а околоземное магнитное поле скачком увеличивается, но лишь на непродолжительное время. Кстати, сама возможность образования ударной волны в бесстолкновительной плазме была впервые предсказана в геофизике, а затем теоретически обоснована в общей физике плазмы.

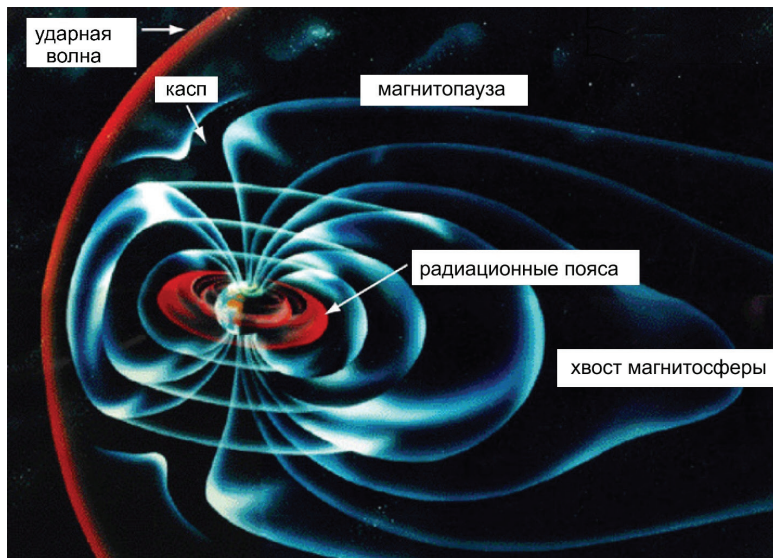


Рис. 4. Магнитосфера Земли, образующаяся при взаимодействии сверхзвукового потока солнечного ветра с геомагнитным полем

Но космофизики нашли более эффективный процесс передачи энергии от солнечного ветра в магнитосферу – пересоединение магнитных полей. Концепция пересоединения, разработанная в космофизике, сейчас применяется и в работах по термоядерному синтезу. В этом процессе ключевую роль играет вмерзшее в поток плазмы ММП. Когда поток плазмы сжимает магнитные поля противоположной ориентации, в узкой области возникают интенсивные токи и включаются мелкомасштабные кинетические процессы (рис. 5). Происходит конверсия энергии магнитного поля в энергию ускоренных частиц, а топология магнитных полей резко меняется. Но как сделать ММП и геомагнитное поле антипараллельными, ведь ММП лежит преимущественно в плоскости эклиптики, а геомагнитное поле ортогонально ей? Это происходит при подходе к земной магнитосфере магнитного облака КВМ или высокоскоростного потока из корональной дыры, которые резко возмущают ориентацию ММП. В результате после пересоединения ММП и геомагнитного поля в лобовой части земная магнитосфера оказывается открытой для электрического поля солнечного ветра $E = -[V \times B]$, и в магнитосферу передается колоссальная энергия – до нескольких тысяч ГВт при сильной магнитной буре (для сравнения все энергопотребление США ~ 3.3 тыс ГВт). В магнитосфере резко усиливается конвекция плазмы и активизируются крупномасштабные токовые системы.

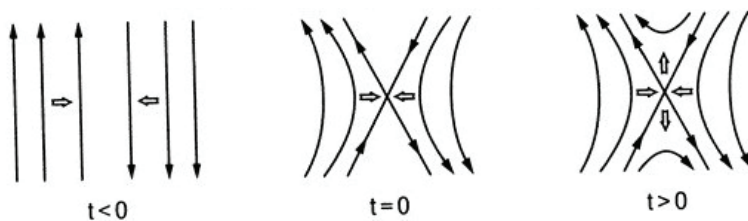


Рис. 5. Эволюция топологии антипараллельных магнитных полей при пересоединении

Есть еще один существенный аспект космической погоды, который не укладывается в приведенный сценарий, и его открытие стало полной неожиданностью для космофизиков. До запуска спутников полагали, что околоземный космос заполнен только низкоэнергичной солнечной плазмой и космическими лучами. Оказалось же, что космос радиоактивен и заполнен постоянно существующей (не только во время бурь) высокоэнергичной радиацией! Эта радиация образует радиационный пояс,

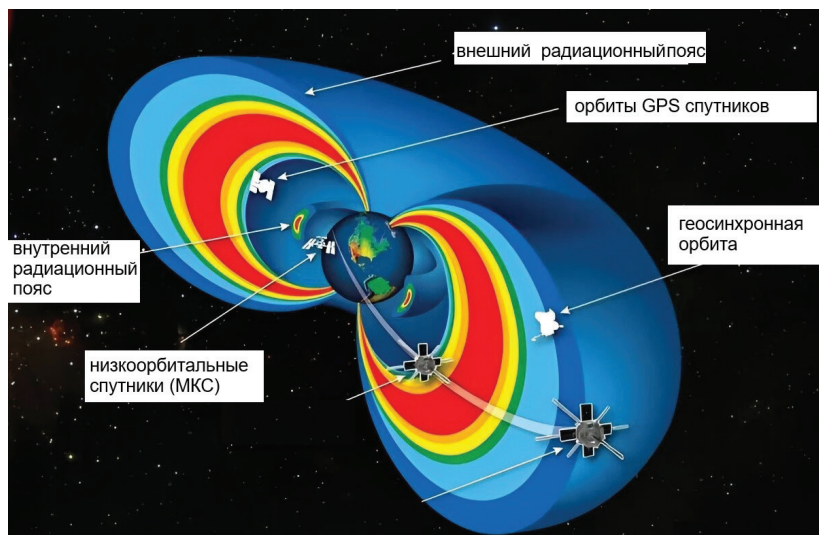


Рис. 6. Внешний и внутренний радиационные пояса Земли – проявление магнитосферы как магнитной ловушки для захвата энергичных частиц

открытый Верновым с коллегами, и названный поясом Ван-Аллена (рис. 6). Магнитосфера оказалась магнитной ловушкой для захвата и удержания энергичных заряженных частиц. Понять, как эта ловушка работает, стало возможно благодаря разработке дрейфовой теории, которая рассматривает не точные траектории частиц, а траектории их ларморовских центров. Дрейфовая теория объяснила формирование магнитной ловушки, в которой частицы бесконечно периодически двигаются по определенным циклическим траекториям, включающим ларморовское вращение в магнитном поле с циклотронной частотой, осцилляции между магнитными пробками вдоль силовой линии с баунс-частотой и дрейф вокруг Земли (рис. 7). Если возникает возмущение магнитного поля с частотой, соответствующей частотам одного из периодических движений, то это вызовет нарушение захвата и приведет как к высыпанию частиц из ловушки в атмосферу, так и их радиальному смещению от дрейфовой оболочки.

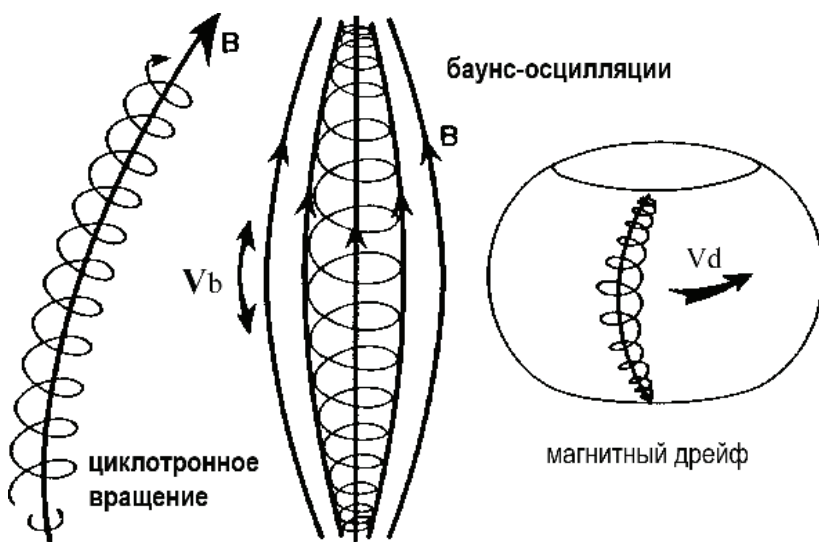


Рис. 7. Периодическое движение частиц, захваченных в магнитосферную магнитную ловушку (слева направо): ларморовское вращение в магнитном поле $\mathbf{B}$ с циклотронной частотой, осцилляции между магнитными пробками вдоль силовой линии с баунс-частотой, и дрейф вокруг Земли со скоростью V_d

Околоземное пространство оказалось не только природной ловушкой, но и ускорителем заряженных частиц. При магнитной буре в магнитосферу проникает крупномасштабное электрическое поле утро-вечер, которое переносит низко-энергичные протоны и электроны из хвоста магнитосферы к Земле. В процессе переноса протоны и электроны ускоряются до десятков-сотен кэВ за счет бетатронного эффекта, и начинают дрейфовать вокруг Земли, образуя кольцевой ток (рис. 8). Кольцевой ток, а соответственно и интенсивность бури, характеризуются планетарным Dst-индексом, измеряемым

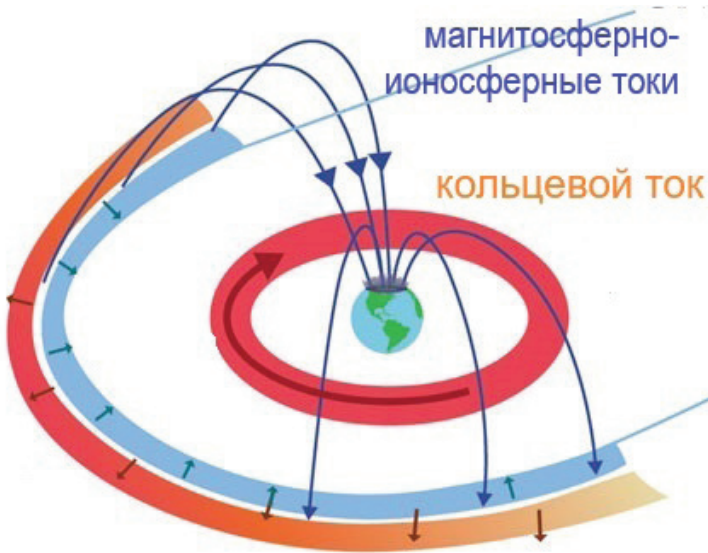


Рис. 8. Образование кольцевого тока энергичными протонами, дрейфующими вокруг Земли, и генерация магнитосферно-ионосферной токовой системы сдвиговым течением на границе магнитосферы

по возмущению поля на приэкваториальных магнитных станциях (рис. 9). Этот индекс прямо пропорционален полной кинетической энергии частиц кольцевого тока и его абсолютное значение может меняться от ~ 100 нТл при слабых бурях до несколько сотен нТл – при сильных (как, например, недавняя буря 10 мая 2024 г.), и даже превышать 800 нТл – при экстремальных. Такие экстремальные бури происходят исключительно редко – пока их было всего несколько за более чем 120 лет наблюдений, но это не значит, что такая буря не может в любой момент повториться.

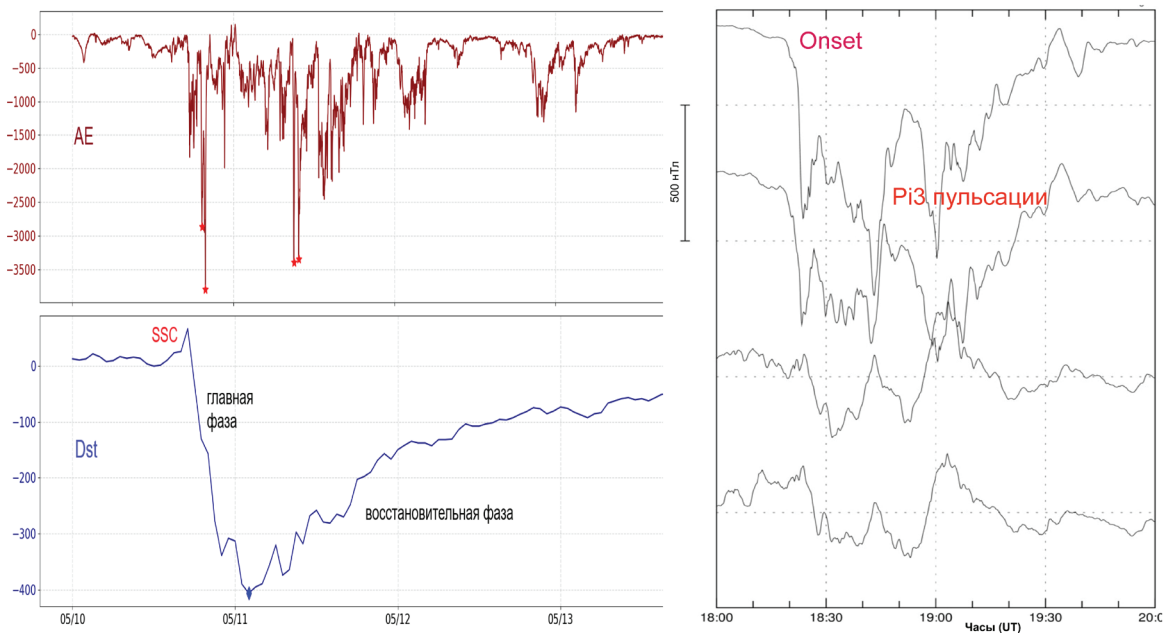


Рис. 9. Возмущение геомагнитного поля во время магнитной бури (слева) и суббури (справа), характеризующиеся Dst и AE индексами. На магнитограммах X-компоненты широтного профиля станций отмечены взрывное начало суббури (*onset*) и *Pi3* пульсации

На фазе восстановления магнитной бури начинает пополняться и внешний радиационный пояс Земли – потоки релятивистских (> 0.5 МэВ) электронов в нем возрастают на 2–3 порядка. Процессы ускорения в открытой магнитосферной системе идут как бы вопреки термодинамике, поскольку происходит перенос энергии от основной массы частиц к небольшой группе электронов вверх

по энергетическому спектру, до 4–5 порядков. Каков механизм этого ускорения окончательно не выяснено, но в нем заведомо принципиальную роль играют электромагнитные волны и излучения, передающие резонансным образом энергию от одной группы частиц к другой, т.к. сами частицы в разреженной околоземной плазме не сталкиваются.

Удивительная особенность геофизических процессов состоит в том, что в них не идет просто регулярное выделение энергии, поступающей от внешнего драйвера, а периодически происходит накопление и спонтанное взрывное выделение энергии. Наглядный пример дает физика Земли, где медленное движение тектонических плит неожиданно сменяется землетрясением. Таким же образом в космофизике постоянно поступающая энергия солнечного ветра и ММП не реализуется сразу, а накапливается в ночном секторе магнитосферы и взрывным образом высвобождается в виде «космотрясения» – суббури. Суббуря, в отличие от магнитной бури, охватывает только ночной сектор и авроральные широты. Суббури возникают как на фоне магнитной бури (наиболее интенсивные), так и изолированно. Если магнитная буря относительно редкое событие (происходит примерно несколько десятков сильных и умеренных бурь в течение года, в зависимости от фазы солнечного цикла), то суббури разной интенсивности возникают в среднем раз в 3 дня. Интенсивность суббури измеряется АЕ индексом, рассчитываемым по данным кольца станций на авроральных широтах (рис. 9, справа).

Наиболее вероятный механизм суббури связан с пересоединением магнитных полей в хвосте магнитосферы, но конкретный сценарий ее развития так и не выявлен. Во время суббури начинает работать ускоритель электронов продольным электрическим полем вдоль магнитосферного магнитного поля. Именно эти ускоренные авроральные электроны, высыпаясь вдоль силовых линий геомагнитного поля в верхнюю атмосферу (100–300 км) и вызывают свечение кислородных эмиссий, т.е. полярные сияния. Ведь даже, если бы плазма солнечного ветра могла напрямую вторгаться в верхнюю атмосферу, то возникло бы лишь слабое субвизуальное свечение, и никаких ярких сияний в небе мы бы не увидели. Полярные сияния возникают как бы в результате образования природной газоразрядной трубки в ночной магнитосфере. Сияния распределены над Землей не хаотично, а образуют авроральный овал, даже заходящий на дневную сторону (рис. 10). Механизм природного ускорителя авроральных электронов окончательно не выяснен, несмотря на большое число гипотез.

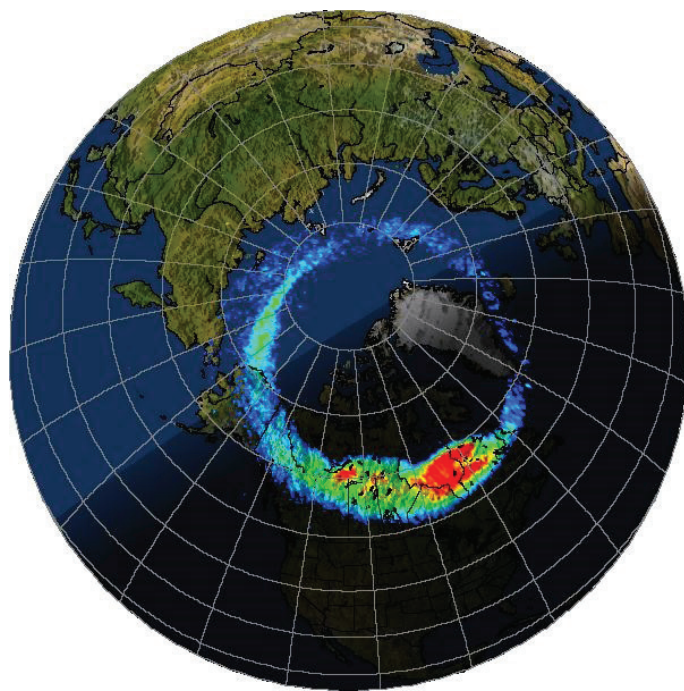


Рис. 10. Овал полярных сияний по данным УФ фотометров спутника на высокоэллиптической орбите

Во время магнитной бури начинает работать генератор кольцевого тока, что и создает глобальное понижение магнитного поля по всей Земле. На флангах магнитосферы генерируются продольные (вдоль магнитных силовых линий) токи, которые замыкаются через авроральный овал (рис. 8). В результате вдоль аврорального овала начинает течь электроджет, который создает сильное магнитное возмущение (до нескольких тысяч нТл) на земной поверхности. Во время взрывной фазы суббури еще подключается генератор локальной токовой системы в ночном секторе из-за того, что ток поперек магнитосферного хвоста разрывается и перезамыкается через ночной сектор аврорального овала (рис. 11). Одновременно активизируются природные ускорители авроральных электронов и релятивистских электронов радиационного пояса. Суммарная мощность, выделяемая при суббуре, доходит до 100 ТВт·час [Сергеев, Цыганенко, 1980] (для сравнения мощность всех источников электроэнергии в РФ ~ 900 ТВт·ч). В ходе развития суббури эта мощность расходуется на работу ускорителей частиц, генераторов тока и драйверов плазмы в околоземном пространстве. Удивительно, что такое разнообразие ярких динамических процессов, сопровождающихся возбуждением столь мощных возмущений геомагнитного поля, возникает из-за того, что где-то в межпланетном пространстве ММП с амплитудой 1–2 десятка нТл изменило направление.

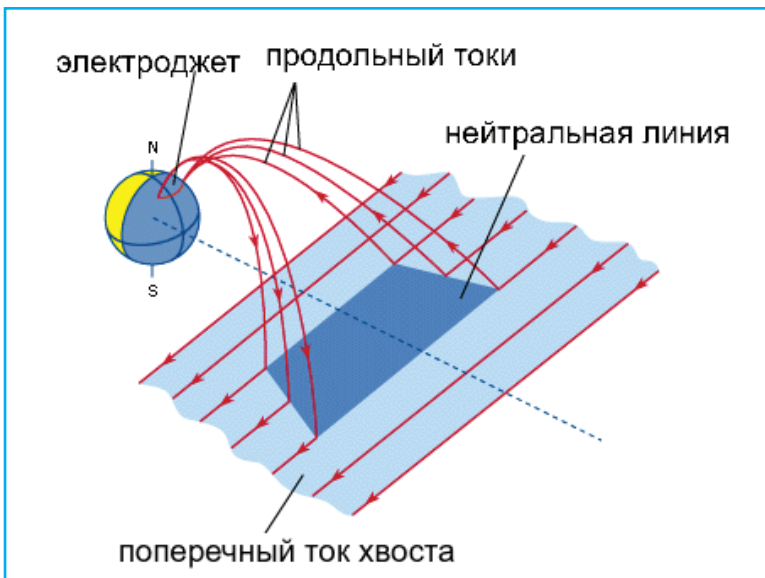


Рис. 11. Локальная магнитосферно-ионосферная токовая система во время взрывной фазы суббури

Как процессы в околоземном пространстве влияют на нашу жизнь

Но вот поток солнечной плазмы долетел до земной магнитосферы и при благоприятной ориентации ММП его энергия перешла в околоземное пространство. Как плазменные процессы в околоземном пространстве могут повлиять на нашу жизнь, помимо возникновения красивых картинок в небе – полярных сияний? На нас скорее всего – никак (хотя гелиобиологи со мной не согласятся). Тем не менее, серьезная угроза существует, но это угроза технологическим системам как в космосе, так и на Земле (рис. 12). Вот несколько примеров проблем, связанных с нарушениями нормального функционирования спутниковых систем:

Электроны внешнего радиационного пояса оказались «убийцами» спутниковой электроники на геостационарной орбите. Потoki релятивистских электронов (> 0.5 МэВ) возрастают на 2–3 порядка через 1–2 дня после начала магнитной бури, и вызывают сбои в больших интегральных схемах, что может приводить к полной потере многотонных космических аппаратов.

Высыпания частиц в ионосферу во время магнитных бурь и суббурь приводят к возбуждению ионосферных неоднородностей и турбулентности, создающих помехи радарам и радиосвязи. Также за счет рассеяния на ионосферных неоднородностях сильные флуктуации, вплоть до потери фазы, испытывают сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) – GPS, ГЛОНАСС, Beidou.

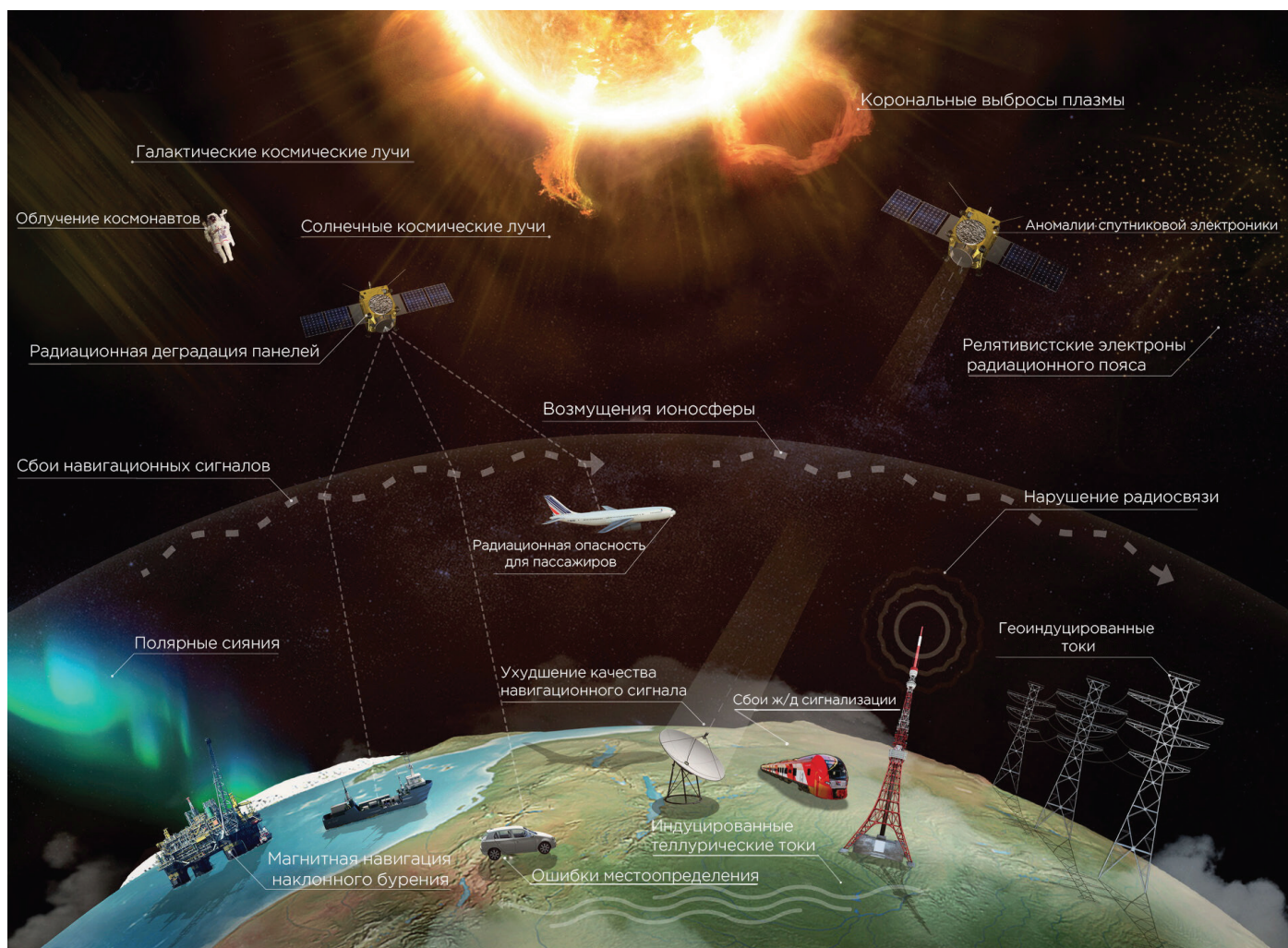


Рис. 12. Технологические системы в космосе и на Земле, подверженные воздействию различных факторов космической погоды

Джоулев нагрев верхней атмосферы мощными авроральными токами (до нескольких млн А) вызывает расширение термосферы и увеличение плотности на спутниковых высотах, что приводит к усиленному торможению спутников. Примером такого воздействия может служить потеря спутников STARLINK, которые не смогли выйти на расчетную орбиту после умеренной магнитной бури в феврале 2022 г.

Авиаполеты на высотах порядка 20 км на высоких широтах при возмущенной космической погоде сопровождаются повышенным риском радиационного облучения экипажа и пассажиров солнечными космическими лучами.

Негативное воздействие космической погоды на наземные технологические системы

В наземных крупномасштабных системах серьезные негативные последствия космической погоды вызываются возбуждением геоиндуцированных токов (ГИТ) в линиях электропередачи (ЛЭП), трубопроводах, трансокеанских кабелях, железнодорожных магистралях [Пилипенко, 2021]. При этом, чем шире внедряются передовые технологии, тем чувствительнее становятся их сбои и выходы из строя. Изменчивость космической погоды и ее негативное воздействие на технологическую среду являются естественной нормой, которую невозможно избежать, но необходимо знать и учитывать.

Энергетические системы

Индуктируемые в поверхностных слоях земной коры при резких возмущениях геомагнитного поля геоэлектрические токи замыкаются через заземленные энергетические системы, вызывая в них появление ГИТ (рис. 13). Современные энергетические сети с крайне сложной геометрией, распространившиеся до высоких широт, оказываются, по существу, гигантской антенной, электромагнитно-сопряженной с токами ионосферы Земли [Boteler, 2001]. Хотя возмущения геомагнитного поля, приводящие к возбуждению ГИТ в проводящих конструкциях, происходят, в основном, на высоких широтах, но при сильных возмущениях овал полярных сияний и текущий в нем авроральный электроджет смещаются далеко к югу, и достигают средних широт.

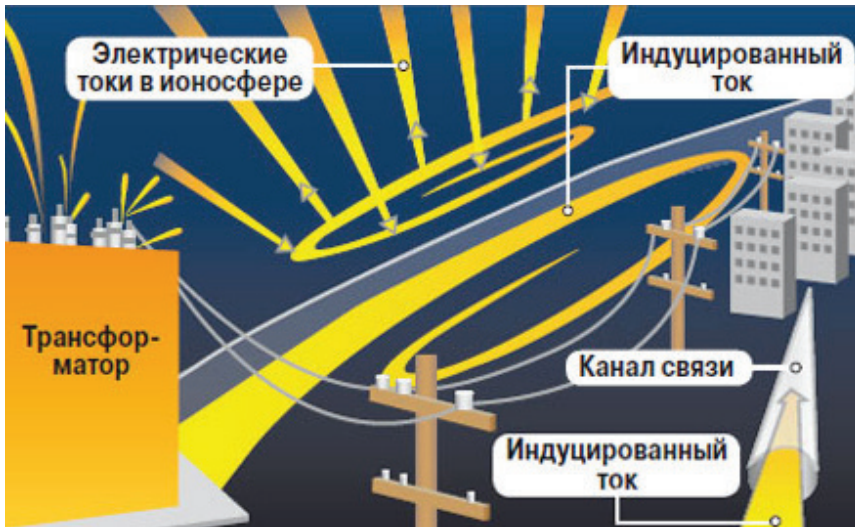


Рис. 13. Объекты электроэнергетики, подверженные действию ГИТ

В процессе индустриального развития постоянно растут длина и межсвязность энергетических линий, увеличивается нагрузка, и идет переход на низкоомные ЛЭП со сверхвысоким напряжением [Cannon et al., 2013]. Это обстоятельство делает электрические сети все более восприимчивыми к негативному воздействию космической погоды. Так, в Канаде и США уровни ГИТ стали в 2–3 раза выше, чем наблюдались 20 лет назад при магнитных бурях той же интенсивности [Трищенко, 2008]. Кроме того, сбои в электросети также могут быть вызваны не только экстремальными геомагнитными возмущениями, но и преждевременным старением компонентов высоковольтных трансформаторов из-за кумулятивного воздействия даже умеренных по величине ГИТ, которые принято считать безопасными [Pirjola, 2000]. На последствия ГИТ может влиять и загрузка сетей. Некоторые прошедшие сильные бури привели бы к более серьезным последствиям, если бы не благоприятные условия в энергетических сетях, благодаря пониженной летней нагрузке.

Известно множество примеров серьезных последствий космической погоды для протяженных высоковольтных электрических сетей [Вахнина и др., 2018]. Интенсивные ГИТ (> 100 А) были измерены при магнитных бурях в нейтральных трансформаторах на подстанциях, где они вызвали насыщение сердечников, перегрев и даже повреждение высоковольтной аппаратуры (рис. 14). Несбалансированные трансформаторы с частично насыщенными сердечниками увеличивают реактивную составляющую и содержание гармоник в подаваемом питании. В результате мощность, доступная для потребителей, уменьшается, а в крайних случаях электрические сети могут стать нестабильными и выйти из строя, вызывая масштабные отключения электроэнергии [Oliveira, Ngwira, 2017]. Однако не существует общего правила того, насколько сильным должен быть ГИТ, чтобы представлять опасность для энергетических систем, поскольку существует много типов трансформаторов с различной чувствительностью к ГИТ. Для некоторых типов силовых трансформаторов требуется всего несколько Ампер постоянной составляющей, чтобы вывести их работу из линейного режима.



Рис. 14. Схема протекания ГИТ через нейтраль трансформаторов (Тр1, Тр2), ЛЭП и поверхностные слои Земли

Через ГИТ природа проявляет себя негативным образом в работе и других технологических систем – в телеграфных линиях и подводных кабелях [Lanzerotti, 2001]. Во время бури 1921 г. в Швеции и США вспыхивали телефонные станции, и была повреждена телефонная, телеграфная и кабельная связь на большей части Европы.

Железнодорожное оборудование

В то время как в большинстве исследований, связанных с космической погодой, основное внимание уделяется влиянию на электрические сети, гораздо меньше внимания обращалось на нарушения работы железнодорожного транспорта, хотя были отмечены вызванные ею аномалии в системах сигнализации и контроля поездов (рис. 15). Историческим первым описанным событием, связанным с аварией железнодорожной сигнализации, явилась буря 1921 г. Во время этой бури вышла из строя система сигнализации на Центральной станции Нью-Йорка, затем загорелась башня диспетчерской. Пожар уничтожил железнодорожную станцию Новой Англии. В качестве примера современных происшествий приведем бурю 1982 г., когда сбои в работе железнодорожной автоматики были отмечены на юге Швеции, где в течение 3–4 ч наблюдались сигналы ложной занятости путей [Wik, 2008]. Были задокументированы сбои в работе систем автоматики на северных ветках РЖД [Пилипенко и др., 2023]. В период 1989–2005 гг. практически каждая сильная буря явилась причиной аномалий в работе сигнальной автоматики на Северной ж.д.



Рис. 15. Северные участки РЖД, в том числе строящийся «Северный ход», находятся в области, потенциально подверженной влиянию космической погоды

Во время бурь геомагнитное поле быстро меняется во времени, что создает разность электрических потенциалов на поверхности Земли до нескольких В/км, которые могут оказывать существенное влияние на работу сигнализации на железной дороге. Принципиальная схема работы рельсовой цепи сигнализации следующая: при отсутствии состава сигнальный ток от источника питания, подключенного к рельсовым нитям, держит под напряжением путевое реле, и на выходе системы выдается сигнал «путь свободен». При появлении состава основная часть сигнального тока пойдет через колесные пары, ослабив этим напряжение на путевом реле, что вызовет сигнал на выходе – «путь занят» (рис. 16). Индуцированные бурей теллурические поля и токи искажают сигнальный ток, что приводит к ложным сигналам о состоянии пути.

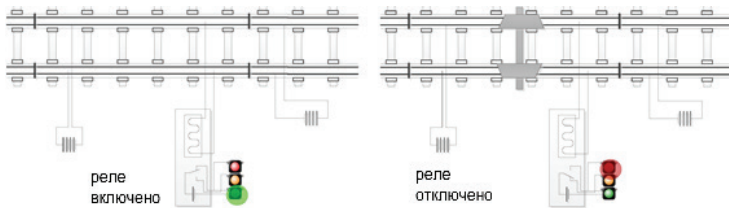


Рис. 16. Принципиальная схема работы железнодорожной сигнализации участка рельсовой цепи: при отсутствии состава сигнальный ток держит под напряжением путевое реле – «путь свободен» (слева); при появлении состава сигнальный ток пойдет через колесные пары, ослабив этим напряжение на путевом реле, что вызовет сигнал «путь занят» (справа)

В целом, современное технологическое общество представляет собой сложное переплетение взаимозависимостей между многими критически важными инфраструктурами. По мере роста сложности технологических инфраструктур любое серьезное нарушение работы одной из них может иметь широкомасштабные последствия для других, и приводить к взаимозависимым отказам. Внедрение цифровых технологий на железных дорогах приводит к дополнительной уязвимости транспортных систем. Также железнодорожный транспорт в значительной степени зависит от других инфраструктур, таких как системы энергоснабжения, связи и навигации, и эти технологии также могут быть нарушены во время возмущений космической погоды [Розенберг и др., 2021].

Трубопроводы

Космическая погода представляет опасность для трубопроводов в зоне интенсивной геомагнитной активности [Костарев и др., 2023]. Воздействия на трубопроводы, создаваемые геомагнитными возмущениями, не мгновенные, а оказывают кумулятивный эффект из-за коррозионного повреждения [Gummow, Eng, 2002]. Электрокоррозия представляет собой электрохимический процесс, возникающий при электрическом токе из трубы в почву. Для предотвращения электрокоррозии стальные трубопроводы оборудованы системой катодной защиты, которая поддерживает отрицательный потенциал трубы ~ 1 В относительно земли. Под действием теллурических полей

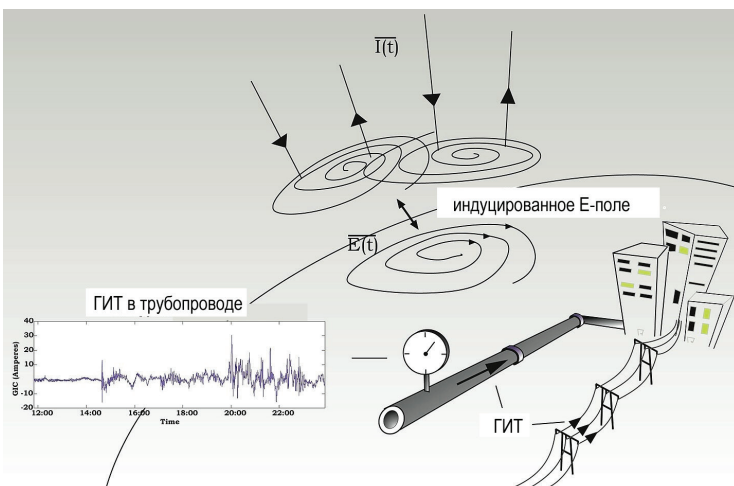


Рис. 17. Воздействие ГИТ на катодную защиту трубопроводов и на ЛЭП

и токов катодная защита трубопроводов искажается, что резко увеличивает скорость коррозии и приводит к сокращению срока эксплуатации трубопровода (рис. 17).

Экономические эффекты ГИТ

Постоянное расширение высоковольтных электрических сетей приводит к увеличению вероятности аварий во время возмущений космической погоды. Однако не обязательно требуются катастрофические сбои для того, чтобы оказать ощутимое экономическое влияние на функционирования оптовых рынков электроэнергии. Даже если энергетическая инфраструктура и не разрушена во время сильных геомагнитных возмущений, ГИТ в региональных энергосистемах могут все же оказывать заметное влияние на экономику в целом. Поскольку ГИТ вызывают насыщение трансформаторов и нарушают управление напряжением, то при этом растут потери и возникают перегрузки при передаче электроэнергии. Из-за чего во время магнитных бурь лимит на передачу энергии неосознанно понижается операторами электрической сети. Например, для сети PJM (США) недостаток энергии на 20% приводит к повышению текущих региональных цен почти в 4 раза [Forbes, 2004]. Эконометрический анализ показывает, что только за 1.5 года экономическое влияние космической погоды на энергетическую систему США составило 0.5 млрд \$.

Самая мощная магнитная буря с $|Dst| \sim 960$ нТл («событие Каррингтона») произошла в 1859 г. Неизбежно, что подобная буря в конце концов произойдет еще раз. Вероятность сопоставимой по мощности бури в течение следующего десятилетия составляет $\sim 12\%$ по оценкам [Cid et al., 2015]. Была оценена вероятная зона отключения энергоснабжения и ежедневный потерянный ВВП США при буре такой интенсивности. Если буря охватит геомагнитные широты $55^\circ \pm 2.75^\circ$, это приведет к прямым экономическим потерям в размере 3.2 млрд \$ в день (8% от ежедневного ВВП). Сценарий, когда магнитная буря охватит широты $50^\circ \pm 7.75^\circ$, приведет к потенциальным экономическим потерям в размере более 40 млрд \$ в день.

Типы геомагнитных возмущений, представляющих опасность для энергетических систем

Решение задач по снижению риска возникновения катастроф космического происхождения не сводится просто к «инженерному» применению результатов солнечно-земной физики для расчета ГИТ в конкретных технологических системах, а требует выяснения физической природы магнитосферно-ионосферных явлений [Hapgood, 2011]. Необходимо выявление типов геомагнитных возмущений, ответственных за наиболее интенсивные всплески ГИТ [Kappenman, 1996].

Наибольшие магнитные возмущения на земной поверхности вызываются протяженным авроральным электроджетом, создающим на земной поверхности магнитные возмущения, ориентированные в широтном (С-Ю) направлении. Однако в быстрые изменения магнитного поля, существенные для возбуждения ГИТ, основной вклад вносят мезомасштабные ионосферные токовые структуры – взрывное начало суббури, геомагнитные пульсации типа $Pi3$ и $Pc5$, дневные внезапные импульсы и ночные спорадические магнитные импульсы [Belakhovsky et al., 2019]. Энергия таких импульсных или квазипериодических возмущений много ниже, чем энергия глобальных магнитосферно-ионосферных токовых систем при магнитных бурях, однако быстро меняющиеся магнитные поля именно таких возмущений вызывают всплески ГИТ значительной величины.

Межпланетные ударные волны

Внезапное начало бури (*storm sudden commencement* (SSC)), вызванное взаимодействием межпланетной ударной волны с магнитосферой, может в течение короткого времени привнести значительное количество энергии и импульса в околоземное пространство. Импульсные SSC возмущения являются предвестниками магнитных бурь, вызываемых KBM, и проявляются как резкий скачок геомагнитного поля (рис. 9, левая панель), который может вызывать всплеск ГИТ до нескольких

десятков А. Некоторые сбои энергосистем, например, разрушение трансформатора энергосистемы Новой Зеландии, были связаны с появлением SSC еще до начала главной фазы бури. Хотя возмущение магнитного поля ΔB , связанное с SSC, относительно мало по сравнению с возмущением во время бури или суббури, величина производной во времени dB/dt может быть достаточно большой, чтобы индуцировать опасные ГИТ. Для операторов ЛЭП SSC проявляется как кажущееся короткое замыкание в линии. Благодаря глобальному характеру воздействия межпланетной ударной волны на геомагнитное поле, величины dB/dt на низких широтах могут быть сопоставимы с такими величинами в высокоширотных областях.

Взрывное начало суббури

Начало суббури и выделение накопленной в хвосте магнитосферы энергии происходит взрывным образом. Основная энергия выделяется в глубине хвоста при пересоединении сильно вытянутых магнитных силовых линий из северного и южного полушарий ($> 20 R_E$), но затравочное возмущение возникает относительно близко от Земли, на расстоянии $\sim 6-8 R_E$. Взрывное начало суббури проявляется в виде резкого падения AL индекса и С-Ю компоненты поля на магнитограммах авроральных станций (рис. 9, правая панель). Большое значение dB/dt в этот момент вызывает значительный всплеск ГИТ до нескольких десятков А, к счастью, кратковременный. Взрывное нарастание суббури может быть вызвано как внешним триггером – резким поворотом ММП к северу, так и начинаться спонтанно. Механизм взрывной неустойчивости, ответственный за начало суббури, надежно не установлен.

Тонкая структура суббури: серии магнитных импульсов типа *Pi3*

После взрывной фазы суббури часто наблюдаются интенсивные нерегулярные пульсации *Pi3* – квазипериодическая последовательность импульсов длительностью 5–20 мин (рис. 9, правая панель). Эти пульсации представляют собой не гармонические колебания, а серию магнитных возмущений

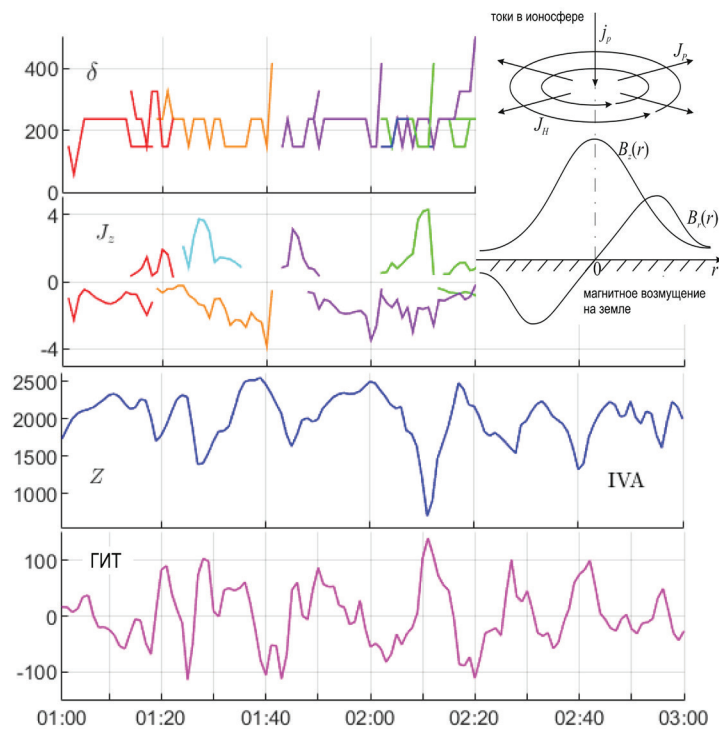


Рис. 18. Результаты выделения вихревых структур в ионосфере по данным 2D сети магнитометров: радиус вихрей δ , плотность продольных магнитосферных токов J_z , вертикальная компонента геомагнитного поля Z на станции IVA, всплески ГИТ. На вставке показана идеализированная структура ионосферного токового вихря, создаваемого струей продольного тока, и наземный магнитный отклик (вертикальная и радиальная компоненты)

с крутыми фронтами, благодаря которым производная по времени магнитного поля высока, до $|dB/dt| > 1000$ нТл/мин. При суббурях с интенсивными $Pi3$ пульсациями всплески ГИТ достигают величины более 100 А в ЛЭП «Северный Транзит» на Кольском полуострове. Предположительно $Pi3$ импульсы вызваны локализованными струями продольного тока, создающими вихревую систему Холловских токов в ионосфере. Мезомасштабные возмущения такого типа можно качественно представлять себе по аналогии с метеорологическими явлениями как «космические торнадо» в ионосфере.

Специальная техника анализа данных 2D сети магнитометров для выделения локализованных вихревых структур в ионосферных токах показала, что фактически источником всплесков ГИТ в ЛЭП являются серии короткоживущих космических торнадо (рис. 18). Экстремальные всплески ГИТ (> 100 А) однозначно связаны с импульсами, образующими $Pi3$ пульсации – последовательностью локализованных с радиусом ~ 200 –250 км вихревых токов, поддерживаемых струями продольных магнитосферных токов попеременно меняющегося направления с плотностью до ~ 5 А/км², и распространяющимися по азимуту в восточном направлении (к Солнцу).

***Pc5* пульсации**

В ранние утренние часы на авроральных и субавроральных широтах наблюдаются квазимонохроматические пульсации $Pc5$ с периодами ~ 3 –5 мин и длительностью до нескольких часов (рис. 19). Эти пульсации являются наземным откликом на резонансные альвеновские волны в

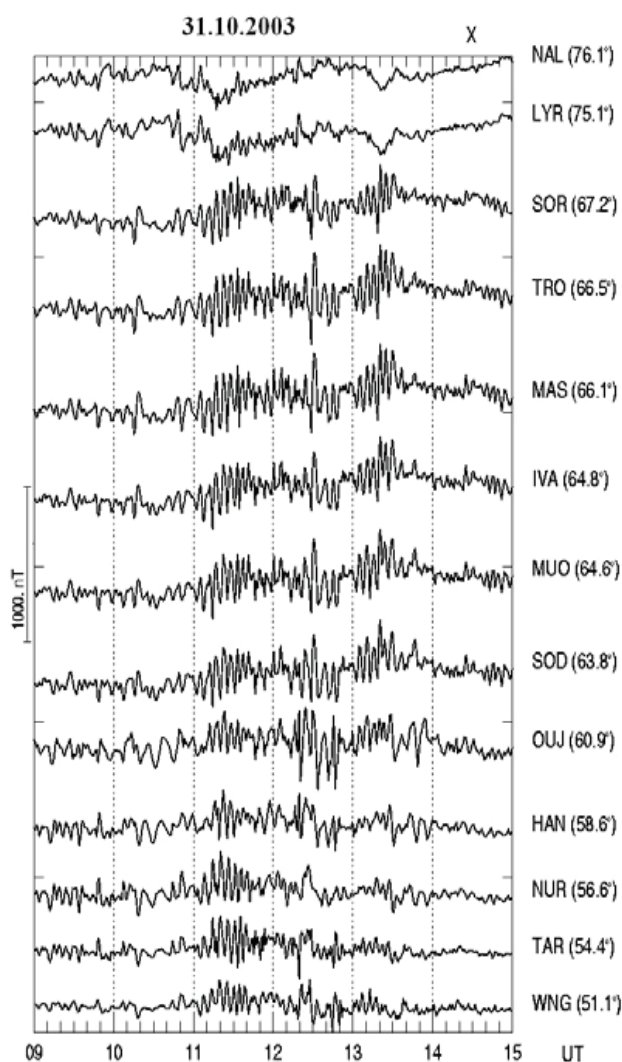


Рис. 19. Монохроматические пульсации $Pc5$, зарегистрированные на профиле станций в Скандинавии. Справа показаны коды станций и их геомагнитные широты

магнитосферном резонаторе, образованном силовыми линиями между сопряженными ионосферами [Пилипенко и др., 2024]. Возбуждение альвеновских колебаний подобно работе природного магнитогидродинамического мазера, в который накачиваются возмущения из солнечного ветра, которые затем фильтруются и усиливаются в области альвеновского резонанса и, наконец, высвечиваются через полупрозрачные зеркала – ионосферы к земной поверхности. Интересно, что идея альвеновского резонанса вначале возникла в геофизике, а затем начала применяться для альвеновского нагрева плазмы в установках для термоядерного синтеза.

Размах $Pc5$ колебаний может превышать 100 нТл, а изменчивость поля $|dB/dt|$ доходить до 500 нТл/мин. Благодаря высокой вариабельности поля величина ГИТ в ЛЭП во время серии $Pc5$ пульсаций достигает ~ 12 А. Длительное существование (несколько часов) ГИТ умеренной интенсивности, вызванных $Pc5$ пульсациями, может быть даже более опасным для долговременной эксплуатации сетей, чем кратковременные всплески ГИТ во время начал суббурь или SSC.

Должны ли военные знать о магнитных бурях?

Изучение космической погоды имеет и военный аспект. В мае 1967 г. радары системы NORAD предупреждения о ракетном нападении начали испытывать сильные помехи, которые были восприняты военным командованием США как попытка глушения системы перед возможным ядерным ударом [Knipp et al., 2016]. Ядерные силы США были приведены к наивысшему уровню готовности «дельта». К счастью для человечества, в аэрокосмических силах США к тому времени начали внедряться системы слежения за Солнцем и космической погодой, которые сообщили о двух последовательных сверхсильных вспышках на Солнце и начале магнитной бури. Буря оказалась достаточно сильной с $|Dst| \sim 387$ нТл, хотя и не экстремальной, но вот мощность радиоизлучения Солнца была необычайно высокой, что и вызвало сильные помехи в системе NORAD.

Во время войны во Вьетнаме ВМФ США попытался установить морскую блокаду вьетнамских портов, установив цепь магнитных мин. Однако неожиданно произошел несанкционированный подрыв большинства мин, причину которого в то время не удалось установить. Только недавно, когда эта информация была рассекречена, космофизики установили, что срабатывание мин было вызвано мощной магнитной бурей.

Во время крупнейших маневров НАТО United Trident в Балтийском море и Северной Атлантике 2018 г. были отмечены нарушения работы ГНСС GPS: погрешность позиционирования увеличилась почти на два порядка по сравнению с обычными условиями. Оказалось, что эти нарушения в приеме навигационных сигналов в ночное время совпали с магнитной бурей.

Стоит упомянуть и проблему преднамеренных электромагнитных воздействий на электронную аппаратуру. В ходе высотных (40–450 км) ядерных взрывов, произведенных США и Советским Союзом, было обнаружено возникновение мощного электромагнитного импульса (ЭМИ). Поражающее действие ЭМИ на электронную аппаратуру, системы связи, радиостанции и радары, энергосистемы было обнаружено на удалениях в тысячи км от эпицентра. Поэтому в ряде стран ведутся работы над созданием сверхмощных направленных источников ЭМИ неядерного типа, предназначенных для поражения электронных устройств [Гуревич, 2016]. Применение средств типа направленного ЭМИ или компьютерной атаки, способных разрушить систему электроснабжения целой страны, может представляться весьма заманчивым, если провести его под прикрытием магнитной бури.

Заключение и задачи дальнейших исследований

К настоящему времени космическая геофизика достигла уровня, позволяющего ставить вопрос о реальном прогнозе космической погоды. Появилась возможность проследить «от колыбели до могилы» процессы зарождения возмущений на Солнце и их распространение в межпланетном пространстве, магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли, и в конечном счете – влияние этих процессов на техногенные и биологические системы [Pulkkinen et al., 2010]. Оперативный мониторинг солнечно-

земных связей ведется на сайтах Центров космической погоды РФ (<http://spaceweather.izmiran.ru>) и США (<https://www.swpc.noaa.gov>). Однако несмотря на мощный арсенал современной космической геофизики – солнечные телескопы, космические станции между Землей и Солнцем, сотни спутников на разных орбитах, сети наземных радаров и магнитометров, и т.п. – проблема прогноза состояния околоземного космического пространства не свелась к чисто «инженерной», и многие фундаментальные вопросы остаются нерешенными [Pulkkinen et al., 2017].

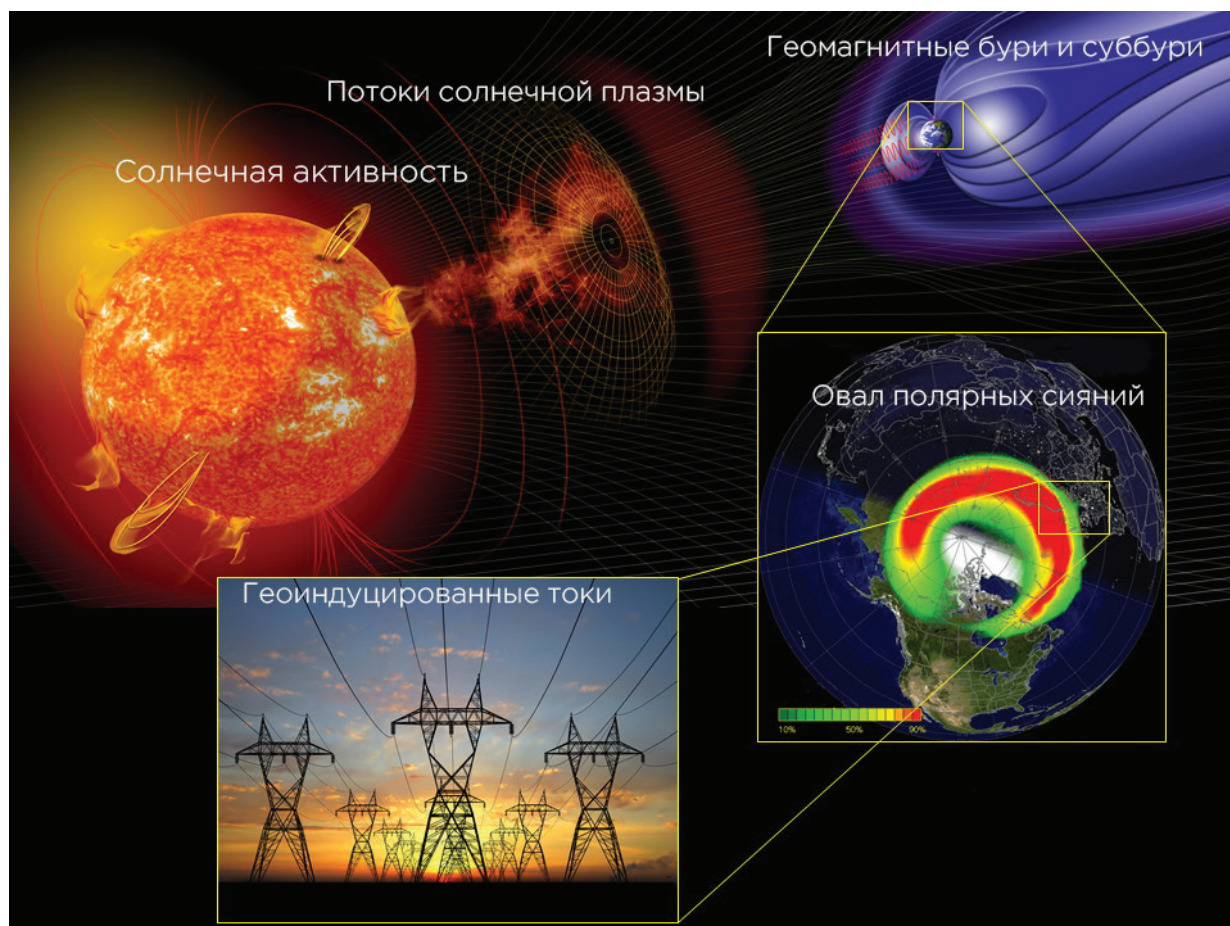


Рис. 20. Солнечно-земные связи как эволюция «от колыбели до могилы» выброса солнечной плазмы, вызывающего магнитные бури и суббури, которые создают сильные токи в авроральном овале, индуцирующие появление ГИТ в протяженных энергетических системах

В отличие от ураганов в атмосфере, которые имеют региональный эффект, и более-менее успешно прогнозируются на 2–3 дня вперед, возмущения космической погоды могут охватывать континенты и развиваться в течение часа после того, как вызывающие их возмущения обнаружены патрульными спутниками в точке либрации ($\sim 200 R_E$ от Земли). Хотя визуальная регистрация солнечных вспышек и КВМ доступна за несколько дней до появления геомагнитных возмущений, лишь небольшая часть солнечных выбросов представляет угрозу появления ГИТ в наземных технологических системах. Какие именно события на Солнце приводят к появлению интенсивных ГИТ – остается нерешенной и активно исследуемой проблемой (рис. 20).

Задача прогноза ГИТ не сводится к задаче прогноза бури или суббури. Необходимая для оценки влияния геомагнитной активности на технологические системы модель должна описывать не только динамику крупномасштабной магнитосферно-ионосферной токовой системы, но и спорадически возникающие в ней быстропеременные локализованные продольные токи [Pilipenko et al., 2024].

Для оперативного прогноза в Центре космической погоды NOAA (США) применяется глобальная компьютерная модель *Space Weather Modeling Framework* (SWMF), которая должна воспроизвести с хорошим разрешением по времени и пространству отклик околоземного пространства на возмущения параметров межпланетного пространства. Эта сверхсложная компьютерная модель (более миллиона операторов) основана на физических принципах и включает более десятка субмоделей для всех областей магнитосферы. Существующая версия SWMF модели позволяет воспроизвести все основные черты динамики возмущенной магнитосферы. Однако вариабельность магнитного поля dB/dt , даваемая моделированием, оказывается более чем на порядок меньше наблюдаемой, поэтому дать оценку возможных ГИТ даже столь мощная модель пока не может. На языке метеорологов задача состоит не только в том, чтобы предсказать наступление космической «непогоды», но и оценить вероятность появления космических «торнадо» – мезомасштабной структуры геомагнитных возмущений.

Наиболее активные проявления геомагнитных возмущений наблюдаются на авроральных широтах, поэтому в северных странах (США, Канада, Скандинавские страны) активно ведутся исследования по влиянию ГИТ на наземные технологические системы и возможным мерам уменьшения негативных последствий [Knipp, 2015]. Эти же факторы представляют опасность для безопасной работы ЛЭП, трубопроводов и ж.-д. магистралей в арктической зоне РФ. Несмотря на исключительную важность таких исследований, российское академическое сообщество мало занимается подобными задачами, а производственные компании РФ не показывают обеспокоенности в возможных угрозах для технологических систем.

Финансирование

Обзор подготовлен при поддержке гранта РНФ (№ 21-77-30010-П).

Благодарности

Выражаю признательность рецензентам за внимательное изучение работы.

Список литературы

Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Шаповалов В.А., Кузнецов В.Н., Селемир В.Д., Карелин В.И., Горохов В.И. Механизмы воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети. М. : Инфра-Инженерия. 2018. – 256 с.

Гуревич В.И. Защита оборудования подстанций от электромагнитного импульса. М. : Инфра-Инженерия, 2016. – 302 с.

Костарев Д.В., Пилипенко В.А., Козырева О.В. Геомагнитный мониторинг для снижения риска для трубопроводов от космической погоды // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Т. 13. № 1. С. 352–363. <https://doi.org/10.28999/2541-9595-2023-13-1-620-635>

Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 3. С. 72–110. <https://doi.org/10.12737/szf-73202106>.

Пилипенко В.А., Черников А.А., Соловьев А.А., Ягова Н.В., Сахаров Я.А., Кудин Д.В., Костарев Д.В., Козырева О.В., Воробьев А.В., Белов А.В. Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. Т. 23. ES2008. <https://doi.org/10.2205/2023ES000824>

Пилипенко В.А., Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Розенберг И.Н. Космическая погода и железные дороги // Земля и Вселенная. 2023. № 6. С. 22–34. <https://doi.org/10.7868/S0044394823060026>

Пилипенко В.А., Позднякова Д.Д., Савельева Н.В. Ультранизкочастотные волны в космосе и на Земле // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. № 9–3 (96). С. 163–205. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-9-3-163-205>

Розенберг И.Н., Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Воронин В.А., Пилипенко В.А. Влияние космической погоды на надежность функционирования железнодорожного транспорта в арктической зоне России // Железнодорожный транспорт. 2021. № 12. С. 20–26. <https://www.elibrary.ru/zhbcew>

- Сергеев В.А., Цыганенко Н.А. Магнитосфера Земли. М. : Наука. 1980. – 174 с.
- Трищенко Л.Д. Геомагнитные возмущения и системы электроснабжения и проводной связи, Плазменная гелиофизика. Т. 2. М. : Физматлит. 2008. С. 213– 219. ISBN 978-5-9221-1041-9.
- Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., Sakharov Ya., Selivanov V. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // J. Space Weather and Space Climate. 2019. Vol. 9. P. A18. <https://doi.org/10.1051/swsc/2019015>
- Boteler D.H. Space weather effects on power systems. In Space Weather: Geophys. Monogr. Ser. 2001. Vol. 25. P. 347–352. AGU. Washington. <https://doi.org/10.1029/GM125p0347>
- Cannon P. et al. Extreme space weather: Impacts on engineered systems and infrastructure. Roy. Acad. Engineer. London. 2013. P. 1–68. <https://doi.org/10.1002/9781118449695.ch1>
- Cid C., Saiz E., Guerrero A., Palacios J., Cerrato Y. A Carrington-like geomagnetic storm observed in the 21st century // J. Space Weather and Space Climate. 2015. Vol. 5. P. A16. <https://doi.org/10.1051/Swsc/2015017>
- Forbes K.F., Cyr O.C.St. Space weather and the electricity market // Space Weather. 2004. Vol. 2. P. S10003. <https://doi.org/10.1029/2003SW000005>
- Gummow R., Eng P. GIC effects on pipeline corrosion and corrosion control systems // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002. Vol. 64 (16). P. 1755–1764. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00125-6](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00125-6)
- Hapgood M.A. Toward a scientific understanding of the risk from extreme space weather // Adv. Space Res. 2011. Vol. 47. P. 2059–2072. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.02.007>
- Kappenman J.G. Geomagnetic storms and their impact on power systems // IEEE Power Engineering Review. 1996. P. 5–8. <https://doi.org/10.1109/MPER.1996.491910>
- Knipp D.J. Synthesis of geomagnetically induced currents: Commentary and research // Space Weather. 2015. Vol. 13 (11). P. 727–729. <https://doi.org/10.1002/2015SW001317>
- Knipp D.J. et al. The May 1967 great storm and radio disruption event: Extreme space weather and extraordinary responses // Space Weather. 2016. Vol. 14. P. 614–633. <https://doi.org/10.1002/2016SW001423>
- Lanzerotti L.J. Space weather effects on technologies // Space Weather. 2001. Vol. 125. P. 11. <https://doi.org/10.1029/GM125p0011>
- Oliveira D.M., Ngwira C.M. Geomagnetically induced currents: Principles // Brazilian Journal of Physics. 2017. Vol. 47 (5). P. 552–560. <https://doi.org/10.1007/s13538-017-0523-y>
- Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., Belakhovsky V.B., Sakharov Ya.A., Selivanov V.V. What should we know to predict geomagnetically induced currents in power transmission lines? // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Vol. 24. P. ES6006. <https://doi.org/10.2205/2024es000954>
- Pirjola R. Geomagnetically induced currents during magnetic storms // IEEE Transactions on Plasma Science. 2000. Vol. 28 (6). P. 1867–1873. <https://doi.org/10.1109/27.902215>
- Pulkkinen A., Hesse M., Habib S., Van der Zel L., Damsky B., Policelli F., Fugate D., Jacobs W., Creamer E. Solar shield: Forecasting and mitigating space weather effects on high-voltage power transmission systems // Nat. Hazards. 2010. Vol. 53. P. 333–345. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9432-x>
- Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A., Viljanen A., Pirjola R., Boteler D., Eichner J., Cilliers P.J., Welling D., Savani N.P., Weigel R.S., Love J.J., Balch C., Ngwira C.M., Crowley G., Schultz A., Kataoka R., Anderson B., Fugate D., Simpson J.J., MacAlester M. Geomagnetically induced currents: science, engineering and applications readiness // Space Weather. 2017. Vol. 15. P. 828–856. <https://doi.org/10.1002/2017SW001501>
- Wik M. The Sun, space weather and effects. Institute of Space Physics. Kiruna. Sweden. 2008. <http://swe.ssa.esa.int/TECEES/spweather/workshops/esww/proc/estec04fnstoa3.pdf>

WHAT IS SPACE WEATHER AND WHY SHOULD WE CARE ABOUT IT?

© 2025 V. A. Pilipenko^{1,2,*}

¹*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**E-mail: pilipenko_va@mail.ru)*

The impact of the Sun on the Earth is not limited to the fact that during a solar flare a stream of particles is «spit out» and then «hits» our planet, but requires clarification of many fundamental physical phenomena, without an idea of which the solar-terrestrial connections cannot be understood. In a review aimed at non-specialists in space physics, we discuss what space weather is and for whom and for what it can be dangerous. Space weather disturbances affect satellite and ground-based technological systems, so at least a superficial understanding of the mechanisms of such an impact is necessary for those who deal with such systems.

Keywords: space weather, solar-terrestrial physics, magnetosphere, magnetic storms, geomagnetically induced currents.