

ВЛИЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

В. А. Пилипенко^{1,2,*}, А. А. Черников³, А. А. Соловьев^{1,2}, Н. В. Ягова^{1,2},
Я. А. Сахаров^{1,4}, Д. В. Кудин¹, Д. В. Костарев^{1,5}, О. В. Козырева^{1,2},
А. В. Воробьев^{1,6}, и А. В. Белов⁷

¹ *Геофизический центр РАН, Москва, Россия*

² *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

³ *Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации
и связи на железнодорожном транспорте, Москва, Россия*

⁴ *Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия*

⁵ *Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия*

⁶ *Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия*

⁷ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия*

Получено 31 октября 2022 г.; принято 27 февраля 2023 г.; опубликовано 24 июня 2023 г.

Предлагаемый впервые в отечественной научной литературе обзор посвящен различным аспектам проблемы воздействия космической погоды на наземные транспортные системы. Анализ имеющейся информации показывает, что возмущения космической погоды могут повлиять на железнодорожную инфраструктуру как из-за прямого, так и косвенного воздействия на компоненты системы. Одним из основных факторов являются геоиндуцированные токи в заземленных протяженных конструкциях, возбуждаемые при возмущениях геомагнитного поля. Связанные с ними теллурические электрические поля и токи могут вызывать нарушения электроснабжения и сбой в функционировании рельсовых цепей железнодорожной автоматики. Косвенное воздействие возможно через нарушения стабильной подачи электроэнергии, нарушения в системах связи и в появлении ошибок местоопределения в навигационных спутниковых системах. В обзоре приведены необходимые для инженеров транспортных и энергетических систем сведения об основных факторах космической погоды, которые могли бы представлять угрозу для таких систем. Приведены примеры влияния геомагнитных возмущений на работу сигнализации северных участков Российских железных дорог (РЖД). Обсуждаются перспективы мониторинга в реальном времени и прогноза космической погоды и полярных сияний для нужд РЖД.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: космическая погода, железнодорожная автоматика, геоиндуцированные токи, глобальные навигационные спутниковые системы, радиосвязь, магнитные бури.

Цитирование: Пилипенко, В. А., А. А. Черников, А. А. Соловьев, Н. В. Ягова, Я. А. Сахаров, Д. В. Кудин, Д. В. Костарев, О. В. Козырева, А. В. Воробьев, и А. В. Белов, (2023), Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах, *Russian Journal of Earth Sciences*, т. 23, ES2008, 10.2205/2023ES000824

1 ВВЕДЕНИЕ: КОМУ ЭТО НУЖНО?

Предлагаемый впервые в отечественной научной литературе обзор посвящен различным аспектам проблемы воздействия космической погоды на наземные транспортные системы. Большая часть информации в мировой литературе рассе-

яна по неакадемическим источникам – отчетам, материалам совещаний, ведомственным сборникам. Анализ имеющейся в литературе информации показывает, что экстремальные возмущения космической погоды могут повлиять на железнодорожную инфраструктуру как из-за прямого, так и косвенного воздействия на компоненты системы. Одним из основных факторов являются геоиндуцированные токи (ГИТ) в заземленных протяженных линиях электропередач (ЛЭП), возбуждаемые при возмущениях геомаг-

Контакты:

*В. А. Пилипенко, pilipenko_va@mail.ru

нитного поля. Связанные с ними теллурические электрические поля и токи могут вызывать нарушения электроснабжения и сбои в функционировании рельсовых цепей железнодорожной автоматики. Косвенное воздействие возможно через нестабильную подачу электроэнергии, нарушения в системах связи и сбои сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) типа ГЛОНАСС/GPS. Современные технологические инфраструктуры становятся все более взаимозависимыми, и, следовательно, уязвимыми, если даже одна из них испытывает негативное воздействие космической погоды. Особое внимание в обзоре уделено нарушениям в функционировании железнодорожной (ж.-д.) автоматики, таким ее элементам как рельсовые цепи и электронные компоненты, встроенные в системы сигнализации. Наряду с описанием современных представлений о возможном воздействии космических факторов на наземные энергетические и транспортные системы, в работе содержатся и новые научные результаты о влиянии геомагнитных возмущений на работу ж.-д. сигнализации. В обзоре приведены необходимые для инженеров транспортных и энергетических систем сведения об основных факторах космической погоды, которые могли бы представлять угрозу для таких систем. Рассказано о современном состоянии и перспективах мониторинга и прогноза космической погоды, а также о методах оценки риска для технологических систем от воздействия ГИТ. В отличие от узкоспециальных работ по различным факторам солнечно-земных связей и инженерным аспектам их воздействия на технологические системы, обзор рассчитан на широкую научно-техническую аудиторию: геофизическая часть написана для операторов систем, а инженерная – для геофизиков. Несмотря на прикладную направленность этих исследований, они не сводятся к «чисто инженерному» применению результатов космической геофизики в расчетах возможных рисков для железнодорожных систем, а ставят ряд принципиальных научных проблем.

2 Проявления космической погоды, которые потенциально могут воздействовать на транспортные системы

Исследования космической погоды, т.е. состояния плазмы, электромагнитных полей и потоков высокоэнергичных частиц в околоземном пространстве, вышли за рамки чисто академического интереса по мере возрастания количества

проблем, связанных с нарушениями нормального функционирования спутниковых и наземных технологических систем. К ним относятся сбои спутниковой и авиационной электроники, частичные или полные отключения электроэнергии, пропадание коротковолновой радиосвязи, деградация сигналов ГНСС, нарушения в работе транспортных систем. Качественно весь комплекс возможных негативных проявлений космической погоды показан на [рис. 1](#). Наибольшее воздействие космическая погода оказывает на технологические системы, расположенные на высоких широтах, при магнитных бурях и суббурях. Слабые и умеренные геомагнитные бури случаются примерно 1700 раз в течение 11-летнего солнечного цикла, а экстремальные бури происходят в среднем 4 раза в течение цикла. Несмотря на относительную редкость экстремальных магнитных бурь, приносимый ими экономический ущерб ставит их в число одних из самых опасных природных катастроф.

Известны многочисленные примеры катастрофических последствий космической погоды, имевшие место по всему миру [[Трищенко, 2008](#)]. При этом, чем шире внедряются передовые технологии, тем чувствительнее для экономики становятся их сбои и выходы из строя. Так расширение сетей магистральных ЛЭП сопровождается повышением вероятности нарушений энергоснабжения под воздействием ГИТ, наводимых геомагнитными бурями и суббурями. Полностью избежать негативных последствий от резких изменений космической погоды невозможно, но необходимо знать и учитывать их воздействие на технологические системы, что в перспективе позволит минимизировать возможные риски.

Интенсивные возмущения геомагнитного поля и ионосферы могут воздействовать и на военные технологии. 4 августа 1972 г. десятки магнитных мин, заложенные в рамках операции США по блокированию морского сообщения с Северным Вьетнамом, самопроизвольно взорвались при отсутствии каких-либо судов. Анализ рассекреченных архивов войны во Вьетнаме показал, что подрыв мин был вызван мощной магнитной бурей [[Knipp и др., 2018](#)]. В 2018 году, во время крупнейших маневров НАТО United Trident в Балтийском море и Северной Атлантике, были отмечены нарушения работы ГНСС GPS. Анализ гелио-геофизической обстановки в период учений показал, что нарушения функционирования системы GPS могли быть вызваны естественными факторами – возмущениями полярной ионосферы в данном секторе Арктики [[Козелов и др., 2019](#)]. Во время развившейся в этот период маг-

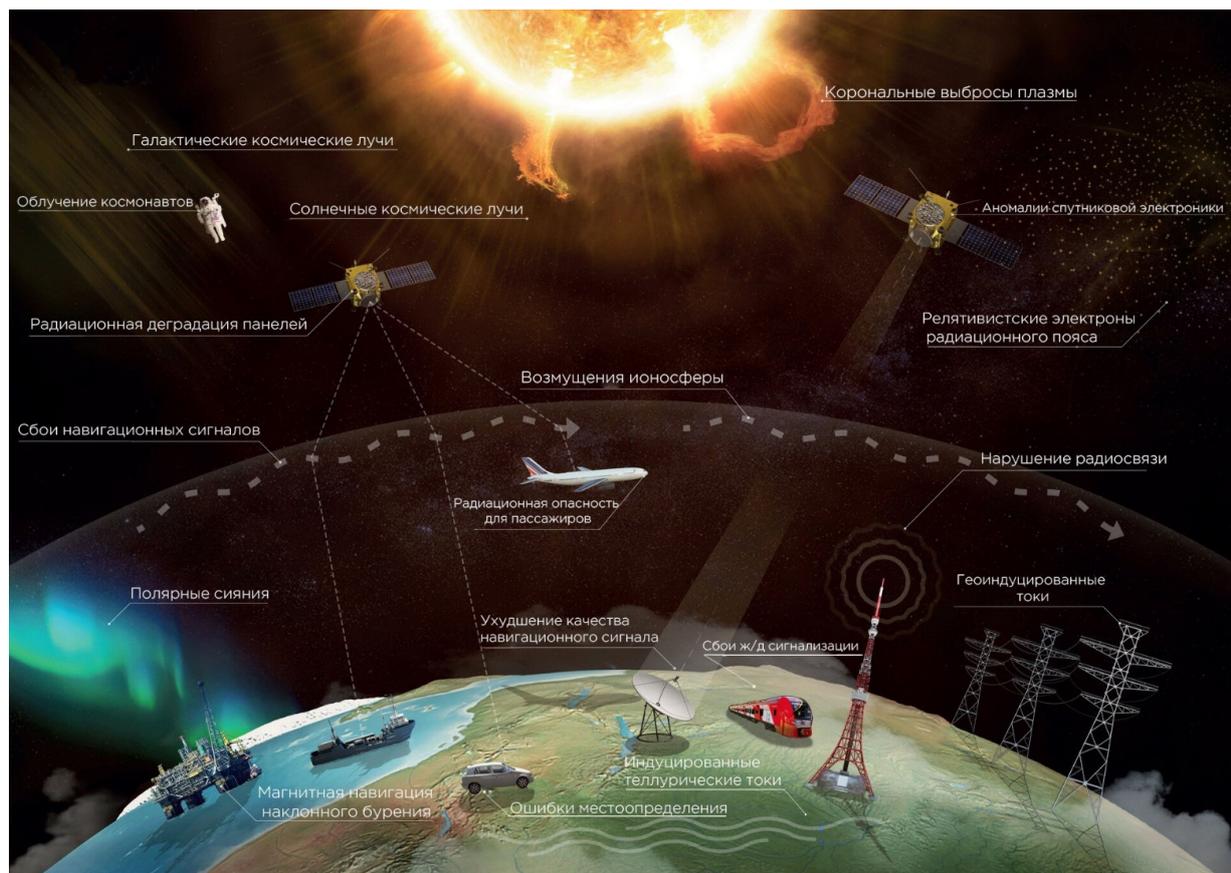


Рис. 1: Иллюстрация различных факторов космической погоды и ее влияния на технологические и транспортные системы.

нитной бури погрешность позиционирования увеличилась почти на два порядка по сравнению со спокойными условиями, что могло вызвать нарушение функционирования навигационной системы GPS.

2.1 Магнитные бури и суббури

Магнитные бури наибольшей интенсивности связаны с коронарными выбросами массы (КВМ), то есть более плотными, по сравнению с невозмущенным солнечным ветром, сгустками плазмы. При южном направлении межпланетного магнитного поля (ММП) происходит пересоединение его силовых линий и магнитного поля в дневных пограничных областях магнитосферы Земли, что способствует интенсивному поступлению энергии солнечного ветра в магнитосферу. В результате усиливаются токовые системы магнитосферы и ионосферы, которые вызывают резкое изменение геомагнитного поля продолжительностью до нескольких суток, и на несколько порядков возрастают потоки высокоэнергичных частиц в околоземном пространстве.

Бури, вызванные КВМ, не имеют строгой периодичности в своем появлении, их частота увеличивается в периоды максимума солнечного цикла, но они не прекращаются и в периоды минимума.

Кроме того, происходят рекуррентные магнитные бури с периодичностью 27 дней, соответствующие периоду вращения Солнца. За рекуррентные бури ответственны высокоскоростные потоки солнечного ветра, истекающие из корональных дыр Солнца. Эти потоки вызывают магнитные бури слабой и средней интенсивности и наблюдаются, как правило, на фазе спада солнечной активности.

Геоэффективность этих типов магнитных бурь неоднозначна и проявляется в различных магнитосферных явлениях по-разному. Интенсивность магнитных бурь характеризуется планетарным индексом *Dst*, отражающим понижение горизонтальной компоненты геомагнитного поля на низких широтах. Эту депрессию геомагнитного поля создает кольцевой ток, образованный инжектированными в магнитосферу энергичными протонами (энергии порядка десятков кэВ), дрейфую-

щами вокруг Земли. Квазидипольное магнитное поле во внутренней магнитосфере образует магнитную ловушку, удерживающую энергичные частицы.

В течение 11-летнего солнечного цикла в среднем около 200 дней могут наблюдаться сильные магнитные бури. За период экспериментальных наблюдений наиболее сильным событием в ближнем космосе считается буря Каррингтона (1–2 сентября 1859 г.), интенсивность которой достигла $Dst \sim -850$ нТл. Однако в те годы еще не было стандартной сети станций для мониторинга Dst индекса, поэтому это значение было оценено по косвенным данным. Возможно, что буря 15 мая 1921 г. могла быть даже более мощной, с $Dst \sim -900 \pm 130$ нТл. Во время космической эры наиболее интенсивным событием была буря 13 марта 1989 г. ($Dst = -640$ нТл). Оценки вероятности повторения таких экстремальных геофизических событий дают значения вероятности около 12% в ближайшее десятилетие [Cid и др., 2015]. По оценке Tsubouchi и Omura [2007] бури, подобные мартовскому событию 1989 г., могут происходить раз в 60 лет. Если бы буря, подобная приведенным выше экстремальным событиям, произошла в наши дни, это создало бы серьезные проблемы для работы технологических систем по всему миру.

В отличие от такого планетарного возмущения как магнитная буря, суббури развиваются только в ночном секторе магнитосферы. Если магнитная буря – относительно редкое событие (примерно несколько десятков сильных и умеренных бурь в течение года, в зависимости от фазы солнечного цикла), то суббури разной интенсивности возникают в среднем 1 раз в 3 дня. Суббурия является своеобразным «космотрясением». Энергия, поступающая от солнечного ветра при благоприятной ориентации ММП, накапливается в хвосте магнитосферы и спонтанно высвобождается при взрывном начале суббури. Наибольшая суббуревая активность возникает на фоне магнитной бури, но суббурия может развиваться изолированно вне бури. Суббурия играет роль локального ускорителя частиц плазмы, которые инжектируются из хвоста в области магнитосферы, соответствующие авроральным широтам. На этих широтах ускоренные электроны и протоны рассеиваются по направлению движения, и часть их высыпается вдоль силовых линий в атмосферу, возбуждая полярные сияния (аврору).

Наибольшие магнитные возмущения на земной поверхности вызываются протяженным вдоль параллели крупномасштабным электрическим током – авроральным электроджетом, который создает на земной поверхности возмущения

(магнитные бухты), ориентированные преимущественно вдоль меридиана (направление С–Ю). Восточный электроджет доминирует в вечернем секторе, а западный – в ночном и утреннем секторах. Однако в быстрые изменения геомагнитного поля существенный вклад могут вносить более мелкомасштабные ионосферные токовые структуры. Такие структуры создают почти изотропные возмущения горизонтальных магнитных полей на земной поверхности.

Ключевое значение для возбуждения ГИТ имеет скорость временных вариаций геомагнитного поля dB/dt . Основная трудность в прогнозировании dB/dt заключается в большой изменчивости масштабов ионосферного тока. Однозначной связи между интенсивностью суббури и величиной вариабельности геомагнитного поля dB/dt не наблюдается, и величина производной $|dB/dt|$ не связана однозначно с величиной магнитной бухты $|\Delta B|$, создаваемой электроджетом. Хотя амплитуда С–Ю компоненты магнитных возмущений ΔX значительно превышает амплитуду В–З компоненты ΔY , т.е. $|\Delta X| \gg |\Delta Y|$, но амплитуды производных $|dX/dt|$ и $|dY/dt|$ оказываются сопоставимыми, и обе горизонтальные компоненты дают соизмеримый вклад в вариабельность геомагнитного поля. Большие значения $|dB/dt|$ почти всегда связаны с западным электроджетом, хотя утренний максимум значений $|dB/dt|$ около 05:00 LT не имеет аналога в суточном ходе интенсивности электроджета. Вероятность же появления больших значений dB/dt в период времени максимального восточного электроджета невелика.

2.2 Тонкая структура суббури: магнитные импульсы и пульсации

Хотя энергетика глобальных возмущений космической погоды, таких как магнитные бури и суббури, намного превышает энергию среднemasштабных магнитосферно-ионосферных возмущений (поперечные размеры порядка первых сотен км), значительные всплески ГИТ вызываются именно тонкой структурой суббури – геомагнитными пульсациями типа Pi3, Ps6, и Pc5 и ночными спорадическими магнитными импульсами [Kozyreva и др., 2019a]. По аналогии с метеорологией локальные возмущения геомагнитного поля можно качественно представлять как «магнитосферные грозы» во время «магнитосферной непогоды» – бури или суббури. Именно такие «магнитосферные грозы» вызывали наиболее интенсивные всплески ГИТ в ЛЭП «Северный Транзит» на Кольском полуострове за все 8 лет наблюдений.

После взрывной фазы суббури часто наблюдаются интенсивные иррегулярные пульсации P13/Ps6, представляющие собой квазипериодическую последовательность импульсов длительностью 5–20 минут. Эти иррегулярные магнитные возмущения часто сопровождаются авроральными явлениями. Эти пульсации представляют собой не гармонические колебания, а серию магнитных возмущений с крутыми фронтами. Пульсации Ps6 наиболее заметны в Y-компоненте, а P13 – в X-компоненте. Благодаря крутым фронтам этих импульсов производная по времени магнитного поля оказывается крайне большой, до ~ 20 нТл/с. Токовые системы в ионосфере, ответственные за импульсные геомагнитные возмущения и всплески ГИТ, представляют собой локализованные (радиус ~ 200 – 250 км) вихревые структуры, поддерживаемые струями продольных магнитосферно-ионосферных токов [Chinkin и др., 2021; Dimmock и др., 2019].

В ранние утренние часы на авроральных и субавроральных широтах наблюдаются квазимонохроматические пульсации Ps5 с периодами ~ 3 – 5 мин, амплитудами десятки нТл и длительностью до нескольких часов. Длительное существование (несколько часов) среднеинтенсивных геомагнитных флуктуаций, вызванных Ps5 пульсациями, может быть даже более опасным для долговременной эксплуатации сетей, чем кратковременные и более интенсивные всплески dB/dt во время взрывного начала суббури. Особенно эффективными источниками могут быть глобальные пульсации Ps5. Этот подтип Ps5 пульсаций возбуждается на фазе восстановления магнитных бурь при высоких скоростях солнечного ветра, имеет амплитуду почти на порядок выше, чем типичные Ps5 пульсации (> 100 нТл), и наблюдается в более широком интервале широт, вплоть до экватора.

2.3 Межпланетные ударные волны и солнечные радиовспышки

Выброс солнечной плазмы, т.е. КВМ, при солнечной вспышке приводит к образованию межпланетной ударной волны. При типичной скорости ~ 500 км/с эта ударная волна за время 3–4 дня (при сверхбыстрых КВМ со скоростями 2500 км/с ~ 12 часов) достигает Земли. Взаимодействие межпланетной ударной волны с магнитосферой Земли проявляется на земной поверхности в скачкообразном увеличении геомагнитного поля – внезапном начале бури (sudden commencement, SC). Импульсные SC возмущения являются предвестниками сильных геомагнитных бурь. Импульсное воздействие ударной

волны может в течение очень короткого времени (несколько минут) привести значительное количество энергии и импульса в магнитосферу. Таким образом, такое явление космической погоды как межпланетная ударная волна может давать очень большие значения $|dB/dt|$, на широтах от авроральной области до геомагнитного экватора.

Солнце является мощным источником электромагнитного излучения в чрезвычайно широком диапазоне длин волн. Всплески солнечного радиоизлучения (радиовспышки) в дециметровом диапазоне статистически слабо связаны с уровнем активности Солнца. Продолжительность и мощность вспышек варьируется от секунд до десятков минут и от 10^2 до 10^6 с.е.п. (солнечная единица потока, 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт м $^{-2}$ Гц $^{-1}$). За эпоху экспериментальных наблюдений наиболее мощный радиовсплеск наблюдался 6 декабря 2006 г., когда поток солнечного радиоизлучения превысил 10^6 с.е.п. на частоте 1.4 ГГц. Статистика за 1997–2016 гг. показывает, что из обнаруженных 2384 вспышек интенсивностью > 100 с.е.п. только 17 можно отнести к классу опасных, и 4 – к классу экстремальных событий [Huang и др., 2018]. Экстремальные и опасные события могут быть причиной серьезных ошибок позиционирования ГНСС, рассмотренных в разд. 4.

2.4 Радиационные условия в околоземном пространстве и спутниковые системы

Заряженные частицы в межпланетной среде включают как потоки разреженной плазмы солнечного ветра (типичные энергии протона ~ 1 эВ), так и высокоэнергичные солнечные ($\sim 10^6$ эВ) и галактические ($\sim 10^9$ эВ) космические лучи. Частицы солнечного ветра надежно экранируются магнитным полем Земли и могут проникать вглубь магнитосферы только в узкой дневной приполярной области, т.н. области дневного каспа. При этом они полностью поглощаются на ионосферных высотах и не попадают в атмосферу. Галактические космические лучи проникают вплоть до поверхности Земли и являются главным источником проводимости атмосферы на высотах больше 2 км.

Помимо энергичных частиц, поступающих в магнитосферу из межпланетной среды, внутри магнитосферы существуют радиационные пояса, заполненные повышенными потоками энергичных заряженных частиц. Внешний радиационный пояс Земли на расстояниях от 3 до 8 R_E образован электронами релятивистских энергий (> 1 МэВ). Динамика внешнего радиационного пояса изучается специалистами по солнечно-земной физике на протяжении нескольких деся-

тилетий, но до сих пор нет ясности, почему их интенсивность может оставаться стабильной в течение нескольких дней–недель, а потом испытывать резкие всплески, увеличиваясь на 2–3 порядка всего за несколько часов. По существу, в околоземном пространстве работает своего рода природный «геосинхротрон», ускоряющий часть частиц солнечного ветра на 5–6 порядков по энергии, природа которого остается невыясненной. Повышенные потоки релятивистских электронов держатся в течение нескольких дней после начала магнитной бури, а потом за счет рассеяния на волнах высыпаются в ионосферу и атмосферу. Динамика интенсивности потоков релятивистских электронов хорошо коррелирует с вариациями скорости солнечного ветра и волновой активностью в магнитосфере. При этом потоки высыпавшихся электронов достаточно велики, чтобы вызывать возмущения ионосферной плазмы, подобные солнечным вспышкам. Широты, соответствующие высыпаниям электронов радиационных поясов, лежат несколько ниже, чем для солнечных космических лучей.

Космическая погода в околоземном пространстве в первую очередь определяется уровнем потоков высокоэнергичных частиц. Эти частицы потенциально опасны для космических аппаратов, т.к. они могут вызывать повреждения внутренних элементов, дифференциальную зарядку внешних и внутренних диэлектриков с последующим пробоем, повреждение панелей солнечных батарей, нарушения в оперативной памяти бортовых вычислительных систем и в работе оптических датчиков ориентации, повреждения тепловой изоляции, загрязнение элементов оптики продуктами испарения материалов с поверхности и др. Резкое возрастание потока солнечных космических лучей в большинстве случаев происходит после солнечных вспышек, что дает возможность предупредить об опасности за несколько дней–часов до прихода этих потоков на орбиту Земли. Однако выбросы корональной массы, сопровождающиеся магнитными бурями и увеличением космической радиации, могут происходить без видимой солнечной вспышки. Высокоскоростные потоки солнечной плазмы, истекающие из корональных дыр, хотя и приводят к появлению относительно слабых рекуррентных (с периодичностью 27 дней) магнитных бурь, но вызывают значительное увеличение потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе. Миниатюризация электроники и внедрение интегральных схем, вызванные необходимостью уменьшения веса и объема бортовой аппаратуры, подвергают опасности пагубного воздействия на ее компоненты высокоэнергичных ча-

стиц. В истории космической физики есть немало примеров, когда многотонные космические аппараты превращались в бесполезную металлическую конструкцию из-за разрушения спутниковой электроники релятивистскими электронами, вследствие чего эти частицы даже получили название «электронов-убийц» (killer electrons).

Недостаточное понимание физики околоземной среды сдерживает создание надежных моделей динамики космической радиации, которые позволили бы оценивать ожидаемые уровни радиации и предупреждать о потенциально опасных для нормального функционирования спутников величинах потоков частиц. Оценка вероятности возникновения аномалий в работе космических аппаратов не является чисто инженерной проблемой. Задача предсказания интенсивности потоков высокоэнергичных электронов и протонов пока не решена, так как до сих пор не установлены окончательно механизмы, ответственные за их ускорение. Классические модели формирования радиационных поясов Земли хорошо описывают общую стационарную структуру внутреннего и внешнего поясов, но не могут объяснить быстрый и значительный рост (~ несколько часов–дней) интенсивности электронной компоненты поясов. Так что конкретный механизм магнитосферного «геосинхротрона», приводящего к ускорению и радикальному дрейфу высокоэнергичных электронов внешнего внутреннего радиационного пояса, пока еще окончательно не определен.

3 ВОЗМОЖНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ИНФРАСТРУКТУРНЫЙ КОМПЛЕКС Ж.-Д. ТРАНСПОРТА

Наиболее интенсивно исследуется влияние возмущений космической погоды на электрические сети, системы связи и навигационные системы. Каждый элемент общего сценария такого воздействия – солнечная активность, распространение выбросов солнечной плазмы в межпланетной среде, воздействие полей и частиц на высокоширотную ионосферу, индуцируемые в наземных технологических системах токи – детально исследуется отдельными научными сообществами (рис. 2). Связанным же с космической погодой нарушениям работы железнодорожной инфраструктуры посвящено несравненно меньше работ.

Первым событием, для которого была задокументирована связь аварии в системе железнодорожной сигнализации с космической погодой,

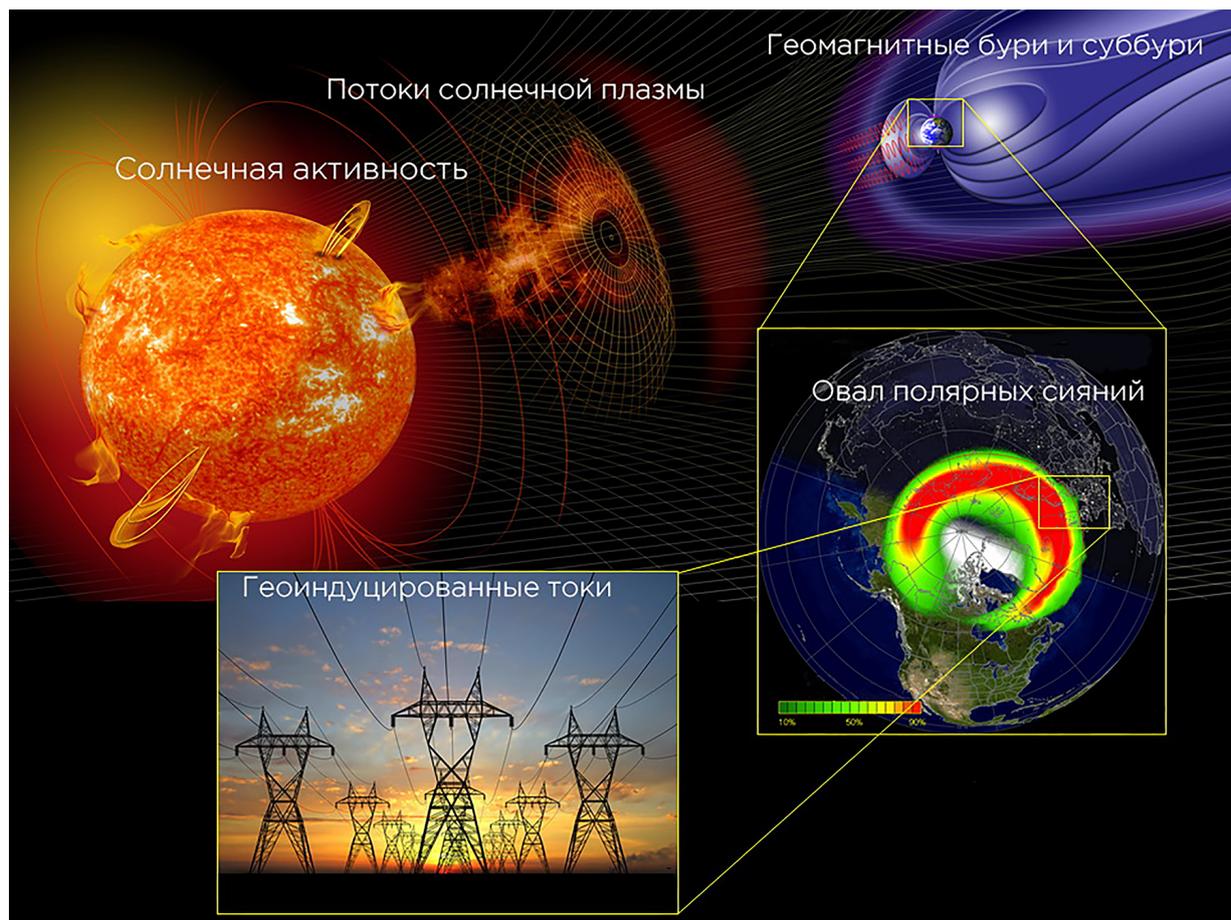


Рис. 2: Сценарий солнечно-земных связей, включающий выбросы солнечной плазмы, возбуждение бурь и суббурь, активизацию авроральных явлений, и генерацию ГИТ в наземных технологических системах.

явилась «буря Нью-Йоркской железной дороги» 13–15 мая 1921 г. [Love *и др.*, 2019]. Во время этой исключительно сильной бури полярные сияния наблюдались даже в Калифорнии. На Центральной станции Нью-Йорка вышла из строя система сигнализации и переключения, затем загорелась башня диспетчерской. Также центральная железнодорожная станция Новой Англии была уничтожена пожаром. Во время той же бури в Швеции вспыхнула телефонная станция, и была нарушена телефонная и телеграфная кабельная связь на большей части территории Европы.

Поскольку ж.-д. сигнализация – одна из важнейших систем транспортной инфраструктуры с точки зрения эксплуатации и безопасности, то даже отдельные случаи сбоев в функционировании этих систем, вызванные скачками напряжения во время магнитных бурь, привлекли особое внимание. Во время бури 13–14 июля 1982 г. с $Dst = -325$ нТл на спаде солнечного цикла были отмечены сбои в работе автоматики на Шведской железной дороге [Wik *и др.*, 2009]. Во время

развития возмущения возникли проблемы со световой сигнализацией: сигнальный светофор переключался между красным и зеленым светом без видимых причин.

В Северной Европе системы сигнализации иногда регистрировали случаи ложных блокировок там, где фактически не было поездов. Анализ электромагнитных помех и их влияние на сигнализацию на ж.-д. во время таких событий изучался в [Niska *и др.*, 2011]. Выяснилось, что к потере способности обнаруживать поезд могут привести повреждения трансформаторов питания рельсовой цепи, при этом характеристики отказа могут изменяться во время движения поезда. Положение поезда относительно ж.-д. сети также может изменить вероятность отказа. Возможные модели воздействия теллурических электрических полей на работу рельсовой сигнализации рассмотрены в разд. 7.

О неожиданном негативном влиянии геомагнитных возмущений на долговременную стабильность функционирования подвижного состава со-

общалось в [Thaduri *и др.*, 2020]. Разрушение подшипников колесных пар резко возрастало во время сильных магнитных бурь. Предположительно, интенсивный ГИТ, протекающий через подшипник, вызывает искрение и разрушение тонкой масляной пленки между вращающейся частью подшипника и его корпусом, что и приводит к ускоренному износу.

В РФ выполнен ряд работ по исследованию связи аномалий в работе ж.-д. сигнализации с геомагнитными возмущениями. В диспетчерских журналах устройств сигнализации, централизации и блокировки в периоды геомагнитных возмущений встречаются записи о плавающих напряжениях, которые отражаются не только на работе автоматики, но и ухудшают качество электроэнергии. Например, во время сильной магнитной бури 29–30 октября 2003 г. в журналах на станциях отмечены следующие аномалии [Sakharov *и др.*, 2009]:

- ложная занятость рельсовой цепи на участках от Беломорска до Сегежи;
- несоответствие уровня питающего напряжения из-за нестабильного питания от Кольской АЭС;
- некачественное энергоснабжение («ломаная синусоида»).

Подобная ситуация развилась в бурю 7–9 ноября 2004 года, когда на Октябрьской и Северной ж.-д. отмечались синхронные множественные сбои в работе автоматики [Сахаров *и др.*, 2009]. Основной характер сбоев – ложная занятость пути и многократное появление плавающих напряжений. Анализ сбоев в работе сигнальной автоматики Северной и Октябрьской ж.-д. во время сильных геомагнитных бурь 23-го цикла солнечной активности (2009–2010 гг.) показал, что аномалии в работе систем автоматики развиваются почти синхронно и в тесной связи с возбуждением значительных геоэлектрических полей. Для Октябрьской ж.-д. за период 2002–2006 гг. при низком и умеренном уровне магнитной активности аномалии в работе ж.-д. автоматики отмечались с частотой от 1% до 10% от исследуемых временных интервалов, а при среднем и высоком уровне активности частота регистрации аномалий составляла 30% и 80%, соответственно [Ptitsyna *и др.*, 2008].

Статистическая связь между уровнем геомагнитной активности и длительностью сбоев в работе систем автоматики Западно-Сибирской и Восточно-Сибирской ж.-д. в 2004 г. исследовалась в работах [Касинский *и др.*, 2007; Ptitsyna

и др., 2007]. Обнаружено, что суммарная суточная длительность аномалий T на всех участках дороги меняется с развитием геомагнитной бури. При достижении пика геомагнитной активности T увеличивается в три раза. Наблюдается положительная корреляция между длительностью аномалий T и локальным индексом геомагнитной активности. В частности, для бурь 17 июля и 5 ноября 2004 г. коэффициент корреляции составил 0,83 и 0,71, соответственно. Дополнительно связь сбоев в работе железнодорожной автоматики с геомагнитными возмущениями рассмотрена в разд. 6.

Внедрение цифровых технологий на железных дорогах, таких как системы «Big Data», «Интернет вещей», «Киберфизические системы» в целом способствует снижению рисков, уменьшению вероятности отказов и повышению общей надежности транспортных систем. Однако большое количество связей между цифровыми подсистемами может привести к дополнительной уязвимости транспортных систем из-за возможных сбоев в работе цифрового оборудования при экстремальных возмущениях геомагнитного поля [Thaduri *и др.*, 2020]. Таким образом, хотя введение сложных цифровых технологий безусловно увеличивает надежность работы транспорта, но в экстремальных случаях отключение таких систем может сделать транспортное сообщение более незащищенным. Особую важность контроль за ГИТ в ж.-д. инфраструктуре приобретает для высокоскоростного ж.-д. транспорта со скоростями составов до 250–350 км/ч. Чтобы исключить возможность серьезных инцидентов, с 2015 г. на высокоскоростной магистрали Пекин – Гонконг ведется контроль ГИТ в различных элементах инфраструктуры [Liu *и др.*, 2016]. Во время магнитных бурь 17 марта и 23 июня 2015 в электрических компонентах магистрали были зарегистрированы токи ~ 1 –2 А.

4 КОСВЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Современное технологическое общество представляет собой сложное переплетение взаимозависимостей между критически важными инфраструктурами. По мере роста сложности технологических инфраструктур любое серьезное нарушение работы одной из них может иметь последствия и для других, что приведет к взаимозависимым отказам с возможностью значительных социальных и экономических воздействий [Garmabaki *и др.*, 2019; Oughton *и др.*, 2017]. По-

этому работа железнодорожных систем косвенно зависит от других, потенциально подверженных воздействию космической погоды, технологий, таких как энергоснабжение, связь и системы позиционирования [Krausmann и др., 2015].

4.1 Нарушения в работе высоковольтных трансформаторов

Наиболее опасным для технологических систем воздействием геомагнитных возмущений является ГИТ, вызванный резкими изменениями геомагнитного поля dB/dt (см. обзор Пилипенко [2021]). Индуцируемые в поверхностных слоях земной коры вариации геоэлектрических токов замыкаются через заземленные энергетические системы, как качественно показано на рис. 3. ГИТ приводят к перепадам напряжения, перегреву силовых трансформаторов и потере реактивной мощности в высоковольтных ЛЭП. Выход режима работы трансформатора из линейного участка под действием ГИТ генерирует гармоники основной частоты рабочего тока, которые могут быть причиной нарушений теплового режима трансформатора, работы защитных реле, а также могут приводить к помехам в работе аппаратуры в сетях потребителей электроэнергии. При этом амплитуды возникающих гармоник нелинейно связаны с величиной ГИТ и определяются типом используемых трансформаторов [Важнина, 2012]. ГИТ опасны в первую очередь для трансформаторных подстанций высоковольтных ЛЭП [Важнина и др., 2018]. Поскольку ГИТ имеют очень низкую частоту по сравнению с промышленной частотой 50/60 Гц, то протекание квазипостоянного тока через обмотки трансформаторов приводит к насыщению их магнитопроводов. Реле защиты силовых трансформаторов обычно отстроены от постоянной составляющей тока и не реагируют на нее. Таким образом, обычная релейная защита не будет реагировать на ГИТ, насыщающие трансформатор, и он просто сгорит. В истории известны случаи повреждения силовых трансформаторов под действием ГИТ во время сильных магнитных бурь, при которых по всему миру происходили срабатывания систем релейной защиты и наступали блэкауты [Gaunt, 2016; Kappenman, 2005]. Влияние ГИТ на силовые трансформаторы происходит не только при стационарной нагрузке, но и во время переходных процессов. В пусковых режимах, при которых возникают броски намагничивающих токов, многократно превышающих номинальные, ненасыщенный трансформатор может перейти в состояние насыщения, и возможно ложное срабатывание дифференциальных защит. С учетом переходных процессов и явления

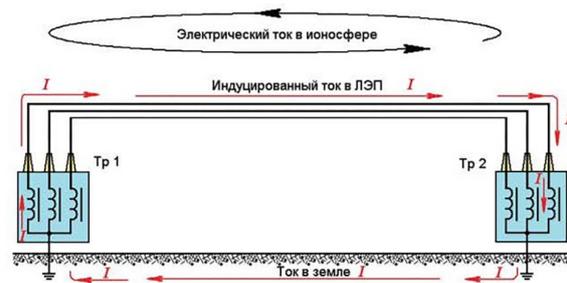


Рис. 3: Качественная схема возбуждения ГИТ в высоковольтных трансформаторах ЛЭП электрическими токами в ионосфере.

гистерезиса потенциальная опасность длительно существующих умеренных ГИТ оказывается выше, чем опасность разовых пиковых нагрузок [Гусев и др., 2020].

Современные энергетические сети с крайне сложной геометрией, распространившиеся до высоких широт, оказываются, по существу, гигантской антенной, электромагнитно-сопряженной с токами ионосферы Земли. В энергетических сетях наблюдались токи до 300 А, в то время как ГИТ с интенсивностью всего несколько А достаточны, чтобы повлиять на работу некоторых типов трансформаторов [Важнина и др., 2018]. Хотя максимальные возмущения геомагнитного поля регистрируются на авроральных широтах, обнаружено, что опасные величины ГИТ в проводящих конструкциях могут наблюдаться и на средних, и даже на низких широтах. В результате появление значительного ГИТ в нейтрали трансформатора приведет к ухудшению качества энергоснабжения на электрифицированных магистралях.

Повышенная геомагнитная активность и большие значения производной по времени от горизонтального магнитного поля dB/dt являются необходимым условием для возникновения большого ГИТ. Такие интенсивные квазипериодические всплески ГИТ в ЛЭП в ранние утренние часы с интенсивностью до 120 А вызывались пульсациями $Pi3/Ps6$ [Belakhovsky и др., 2019]. Именно с этими пульсациями во время суббурь связаны наиболее интенсивные ГИТ в ЛЭП «Северный Транзит» на Кольском полуострове за все 8 лет наблюдений.

Источником кратковременного и интенсивного всплеска ГИТ оказывается воздействие межпланетной ударной волны на геомагнитное поле. Хотя глобальное возмущение ΔB , связанное с SC, относительно мало по сравнению с ΔB во время бури, величина производной во времени $|dB/dt|$ может быть достаточно большой, чтобы индуци-

ровать опасные ГИТ на всех широтах [Пилипенко и др., 2018]. Некоторые сбои энергосистем были связаны с появлением SC еще до начала главной фазы магнитной бури [Zhang и др., 2015]. Например, разрушение трансформатора энергосистемы Новой Зеландии [Béland и Small, 2005] совпало с SC. Таким образом, межпланетные ударные волны, предвещающие магнитные бури, могут быть дополнительным фактором, влияющим на устойчивость передачи электроэнергии на широтах от авроральной области до геомагнитного экватора.

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 обычно принято считать безопасными. На последствия ГИТ может влиять и загрузка сетей. Так, Wik и др. [2009] показали, что магнитная буря 13–14 июля 1982 г. привела бы к более серьезным последствиям, если бы не благоприятные условия в энергетической сети благодаря пониженной летней нагрузке.

Нарушения работы ЛЭП являются наиболее очевидными последствиями ГИТ. Несбалансированные трансформаторы с частично насыщенными сердечниками увеличивают реактивную составляющую и содержание гармоник поданного питания от электростанций. Следовательно, эффективность распределения мощности уменьшается, в результате чего мощность, доступная для потребителей, может уменьшиться. Во время магнитосферных возмущений, когда происходит перегрузка трансформаторов и смещение их рабочей точки, электрические сети способны становиться нестабильными и могут даже выйти из строя, вызывая масштабные отключения электроэнергии [Pulkkinen и др., 2017]. Для передачи больших объемов энергии на большие расстояния строятся все более протяженные ЛЭП. Однако такие линии особенно подвержены воздействию ГИТ. Это обстоятельство делает электрические сети все более восприимчивыми к возмущениям 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 [Molinski, 2002].

Влияние ГИТ на оборудование тяговых подстанций на ж.-д. магистралях, где присутствуют трансформаторы, чувствительные к ГИТ, остается важным, но малоизученным вопросом. На данный момент нет задокументированной информации, подтверждающей или опровергающей влияние ГИТ на работу тяговых подстанций.

4.2 Влияние космической погоды на системы радиосвязи на железной дороге

Надежная работа систем радиосвязи на ж.-д. транспорте является одним из основных факторов обеспечения безопасности движения подвижного состава. В настоящее время на сети железных дорог развернуты аналоговые и цифровые системы радиосвязи стандарта DMR и GSM-R, а в дальнейшем планируется переход на цифровые системы радиосвязи LTE-R (5G). Вопрос надежности радиосвязи возникает особенно остро при внедрении таких технологий, как сдвоенные поезда и виртуальная сцепка. Анализ данных мониторинга сигнал/шум систем радиосвязи показал, что до половины помех составляют неисправности устройств ж.-д. инфраструктуры, по большей части энергетического комплекса. Из 7 случаев проезда на запрещающий сигнал светофора за 4 месяца 2020 г. на Дальневосточной ж.-д. в 4 случаях сопутствующим нарушением было нарушение регламента связи между машинистом и руководителем движения.

Основной тенденцией развития технологической радиосвязи на ж.-д. становится необходимость значительного увеличения потока передаваемой информации со стационарных средств на подвижной состав и обратно [Goodman, 2005]. Это необходимо для обеспечения надежного мониторинга подвижного состава, автоматизации процессов его ведения и обслуживания. Увеличение объема обмена информацией требует перехода работы цифровых систем радиосвязи на более высокие частоты. Надежная радиосвязь исключительно важна при освоении Арктического шельфа, для связи с подвижным ж.-д. составом, судами Северного морского пути и самолетами, а также для навигации и загоризонтной радиолокации. Наиболее подвержена ионосферным возмущениям радиосвязь в коротковолновом (КВ) диапазоне (1–10 МГц) [Бернгардт, 2017]. Несмотря на то, что в настоящее время интенсивно развиваются волоконно-оптические, радиорелейные и особенно спутниковые системы связи, КВ-радиосвязь остается серьезной альтернативой спутниковой связи. Благодаря внедрению современных средств цифровой обработки сигналов удается быстро наращивать скорость передачи информации в радиоканалах [Благовещенский, 2013]. Так, скорость передачи данных с 1985 по 2005 гг. в КВ-диапазоне возросла в 1000 раз, при этом стоимость сообщений по КВ-каналам в сотни раз ниже, чем у спутниковых. Поэтому, целесообразно комбинировать спутниковые системы с КВ-линией, если связь не должна прерываться во время аномальных явлений. Возрождение

интереса к КВ-радиосвязи специального назначения объясняется еще и уязвимостью спутниковых систем связи в военное время. При организации высокоширотных КВ радиолиний используются алгоритмы, которые автоматически управляют замираниями, корректируют ошибки, выбирают частоты и моды распространения, поэтому на данный момент можно рассматривать КВ-системы как альтернативу спутниковым связным системам. Но увеличение надежности КВ-систем радиосвязи является сложной проблемой, поскольку распространение радиоволн декаметрового диапазона в полярных областях сильно зависит от гелио-геофизической обстановки. Волны этого диапазона реагируют на малейшие изменения состояния ионосферы, особенно на высоких широтах, где ионосфера состоит из различных крупномасштабных структур со свойственными им особенностями поведения – овал полярных сияний, полярная шапка и т.п. Кроме того, высокоширотная ионосфера подвержена воздействию высыпавшихся потоков частиц и электрических полей во время геомагнитных бурь/суббурь. При этом меняются критическая частота и высота F -области, что на радиотрассах проявляется в виде изменений амплитуды сигнала и диапазона рабочих частот. Нарушение регулярной структуры ионосферы и образование мелкомасштабных неоднородностей и градиентов электронной концентрации приводят к изменению траектории волны, образуя боковые сигналы, которые являются существенной помехой при приеме сигналов в системах радиосвязи, навигации и радиолокации.

Влияние на радиосвязь в диапазоне от нескольких МГц до десятков ГГц возмущений космической погоды рассмотрено в [разд. 7](#).

4.3 Оценки теллурических токов и геомагнитных рисков

Современные энергетические системы – это громадная сеть с крайне сложной топологией, покрывающая обширные территории земной поверхности, локальные геоэлектрические свойства которой (например, проводимость) различаются до 5 порядков величины. В средах с низкой проводимостью вероятность негативного воздействия сильных магнитных возмущений резко повышается, т.к. наведенные токи преимущественно текут через проводящие элементы промышленных сетей. Разность потенциалов в поверхностных слоях коры является причиной возникновения перегрузок в заземленных электроэнергетических системах. Корректный расчет теллурических электрических полей и токов требует

наличия достаточно плотной сети магнитометров и информации о геоэлектрическом разрезе земной коры. Оптимальной глобальной модели геоэлектрической проводимости не существует, поэтому при расчетах приходится пользоваться различными приближенными схемами. Сопоставление различных методик показало, что с хорошей точностью для расчета теллурических полей можно пользоваться импедансным соотношением в приближении плоской волны и плоской геометрии [*Pirjola, 2002*]. Упрощает ситуацию то, что для практически важных расчетов ГИТ важны интегральные оценки разности потенциалов между узлами протяженной энергетической системы (не менее нескольких сотен км), и поэтому необходимые оценки с достаточной точностью можно провести и со сравнительно редкой сетью магнитометров и грубой моделью проводимости.

На поверхности Земли выполняется импедансное соотношение $\mathbf{E}(f) = Z(f)\mathbf{H}(f)$ между спектральными амплитудами векторов горизонтальных электрических $\mathbf{E} = \{E_x, E_y\}$ и магнитных $\mathbf{V} = \{X, Y\}$ составляющих (приближение плоской волны). Здесь $Z(f)$ – тензор поверхностного импеданса, определяемый распределением удельного сопротивления $\rho(z)$ внутри Земли. Для однородной земной коры импеданс $Z = \sqrt{\mu_0 \omega \rho}$ и зависит от периода геомагнитного возмущения как $Z(T) \propto T^{-1/2}$. Теллурическое E -поле для горизонтально-однородной среды может быть синтезировано по измеряемым геомагнитным вариациям с использованием импедансного соотношения через тензор импеданса $Z(f)$. Для 3D неоднородной среды расчеты теллурического поля значительно усложняются.

Обычно предполагается, что интенсивность ГИТ пропорциональна производной по времени геомагнитного поля, $J \sim dB/dt$. Однако в реальных ситуациях контур, по которому протекают ГИТ, формируется ЛЭП, контактами заземления, оконечными трансформаторами и землей. Электрические параметры этих элементов, а также их зависимость от частоты известны очень приблизительно. Фактическая связь между спектральным составом магнитных вариаций $\Delta \mathbf{B}$, теллурическим электрическим полем E и током J должна быть изучена для каждой энергетической системы отдельно. Частотная зависимость $Z(f)$ приводит к тому, что взаимодействие геомагнитного поля с проводящей земной корой действует как низкочастотный фильтр, в результате которого высокочастотная часть спектра в вариациях теллурического поля оказывается ослабленной по сравнению с $dB/dt(f)$ в исходных геомагнитных вариациях [*Kozyreva и др., 2019b*].

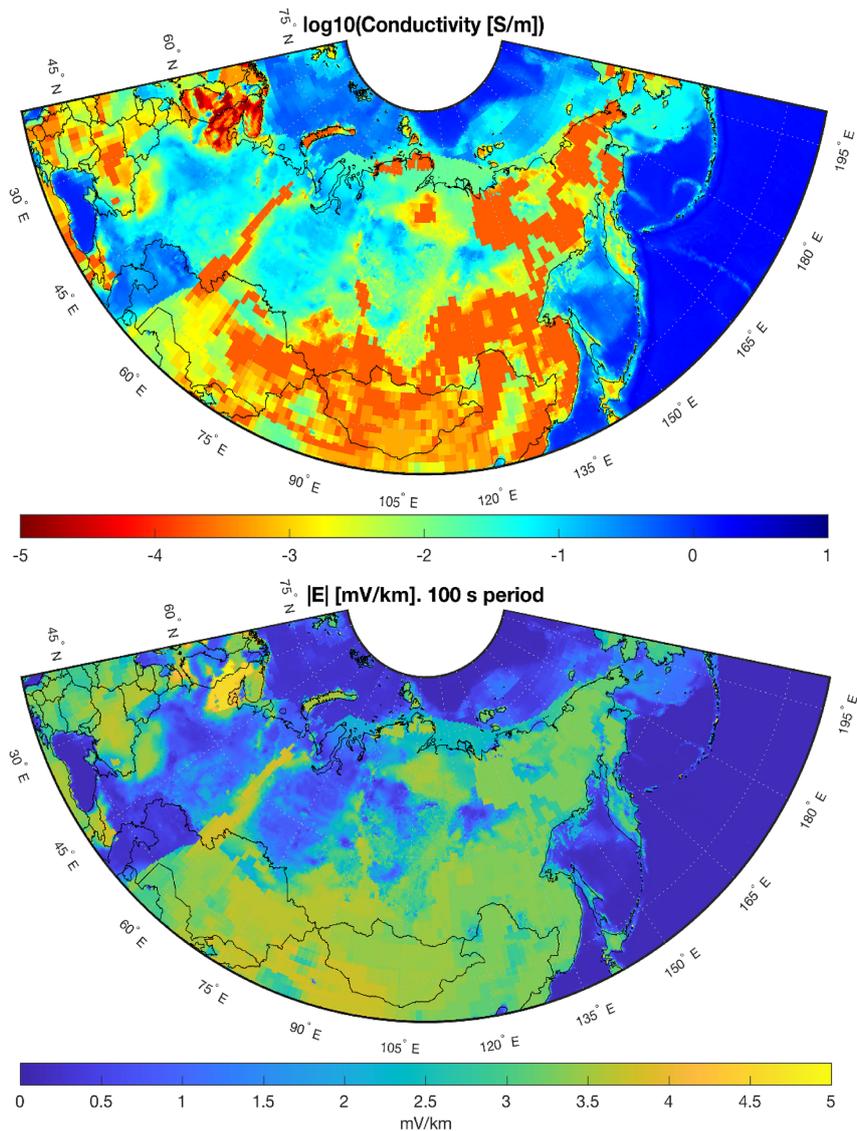


Рис. 4: Верхняя панель: Карта пространственного распределения интегральной проводимости поверхностного 10-км слоя земной коры S на территории РФ по модели [Alekseev *и др.*, 2015]. Нижняя панель: Карта амплитуд синтетических геоэлектрических полей, которые могли бы возбуждаться пространственно-однородными вариациями магнитного поля с амплитудой $|\mathbf{B}| = 1$ нТл и $\omega = 100$ с из работы [Козырева *и др.*, 2022].

Для оценки геоэлектрических полей, которые могли бы возбуждаться заданным геомагнитным возмущением в различных регионах, можно воспользоваться информацией об импедансах земной коры, скомпилированных в модели [Alekseev *и др.*, 2015]. Эта модель для всего мира включает информацию о многих проведенных магнитотеллурических зондированиях. Наибольшими сопротивлениями, т.е. малыми значениями интегральной проводимости, $S \sim 10^{-5} - 10^{-4}$ См, обладают породы в районе Кольского полуострова, Карелии, Урала, Новой Земли и Чукотки (рис. 4, верхняя панель). В качестве примера при-

ведем карту амплитуд синтетических геоэлектрических полей, которые могли бы возбуждаться пространственно-однородными вариациями магнитного поля с $|\mathbf{B}(f)| = 1$ нТл на территории РФ [Козырева *и др.*, 2022]. Так как амплитуда геомагнитных вариаций убывает, а величина индуцированного электрического поля растет с частотой, отклик ГИТ на геомагнитное возмущение должен иметь максимум на некоторых промежуточных частотах. Исследования всплесков ГИТ показали, что наибольшие амплитуды ГИТ соответствуют возмущениям с периодами $10^2 - 10^3$ с. Поэтому в качестве характерного периода выбрано значе-

ние $T = 100$ с. Согласно рассчитанной карте «теллурической опасности» (рис. 4, нижняя панель), наибольшие значения нормированных теллурических полей до $E \sim 5$ мВ/км должны возбуждаться на северо-западе РФ и на Урале. При этом для северо-западного региона различие в величинах теллурического поля E для различных точек может составлять 3–4 раза при одинаковых амплитудах магнитного возмущения. Внешнее магнитное возмущение с большими периодами дает меньшие амплитуды теллурических токов. Карта на рис. 4 показывает, что геологическое строение существенно влияет на амплитуду геоэлектрических полей, генерируемых магнитными возмущениями. Построенная карта позволяет быстро оценить области, наиболее подверженные рискам от ГИТ при возмущениях геомагнитного поля.

5 ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАБОТУ СЕВЕРНЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

В течение 2000–2005 гг. Центр прогнозов космической погоды ИЗМИРАН получал много сообщений с Северной ж.-д., а также несколько сообщений с Горьковской ж.-д., о сбоях в работе системы сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) [Belov *и др.*, 2007]. При этом на пультах дежурных по станциям появлялись ложные сигналы занятости секций вдоль главного пути при отсутствии на них подвижного состава, что приводило к существенным задержкам в движении поездов. Проверка аппаратуры после таких сигналов выявляла нормальное функционирование систем.

Сравнение полученных сообщений с данными по вариациям геомагнитного поля выявило хорошо выраженную корреляцию между нарушениями в работе автоматики Северной ж.-д. и развитием магнитных бурь в эти периоды [Касинский *и др.*, 2007]. Анализ сбоев в работе систем сигнализации во время сильных геомагнитных бурь показал, что количество сбоев возрастало во время подавляющего большинства бурь, а суточная вариация зарегистрированных аномалий согласуется с суточным ходом интенсивности предполагаемых ГИТ [Eroshenko *и др.*, 2010].

Более детальный анализ времени сбоев и геомагнитных возмущений приведен в этом разделе. Следует отметить, что эти периоды выбирались по поступившей информации о сбоях, а не по геофизической обстановке. Несмотря на то, что в путевых журналах существуют отметки о ложной занятости путей и в другие моменты времени, эти сигналы всегда были обусловлены кон-

кретными техническими причинами (обрыв приварных соединений, потеря контакта, закорачивание рельсовой цепи, растяжка стыка, попадание стружки в стык, механическое повреждение изоляции и т.п.). Причины имели разовый характер и своевременно устранялись. При сбоях же, перечисленных в поступивших рапортах, «занятость» рельсовых цепей происходила бессистемно и одновременно на нескольких станциях, без выявленных причин, так что эти аномалии считались спонтанными и необъяснимыми. Причиной таких явлений могут быть наведенные токи в системе ж.-д. автоматики, и по-видимому, они происходят достаточно часто на высокоширотных участках ж.-д.

Мы проанализировали таблицу со случаями отказов без видимых причин (сигналы о ложной занятости путей) в системах СЦБ на высокоширотных участках Горьковской и Северной ж.-д., собранные ИЗМИРАН из путевых журналов и рапортов руководства дорожных лабораторий. Анализ аномалий и их причин, указанных в рапортах и журналах ж.-д. служб, показал, что примерно 45% аномалий были связаны с обрывами, ударами и разрывами кабелей, с метеорологическими причинами (попадание льда и песка в стрелки), с вмешательством посторонних лиц, т.е. заведомо не были вызваны геомагнитными факторами. Эти случаи были отброшены, а оставшиеся аномалии были использованы для поиска возможных связей с геомагнитной активностью. Предварительный анализ показал совпадение значительного роста индексов геомагнитной активности (Ap, Dst) с аномалиями в системе СЦБ [Птицына *и др.*, 2008]. За период 2000–2005 гг. произошло 15 мощных магнитных бурь, и каждая из них вызвала сбой в работе ж.-д. системы сигнализации.

На рис. 5 (левая панель) представлена карта Горьковской ж.-д., где отмечены участки, на которых наблюдались сбои в работе СЦБ системы. В предварительном анализе эти события связывались с мощнейшими магнитными бурями, при этом использовались планетарные индексы геомагнитной активности: трехчасовые Kp , и часовые Ap и Dst . Однако долготное распределение интенсивности магнитных возмущений во время магнитных бурь и суббурь сильно неоднородно, поэтому использование лишь планетарных индексов может привести к ложным выводам – вряд ли суббуря на Аляске повлияет на работу ж.-д. в западной части РФ. Поэтому ниже будут сопоставлены периоды появлений аномалий в работе ж.-д. автоматики с магнитограммами ближайших магнитных станций северо-запада (LOZ, SOD) и центральной части (BOR, MOS) РФ. Дан-

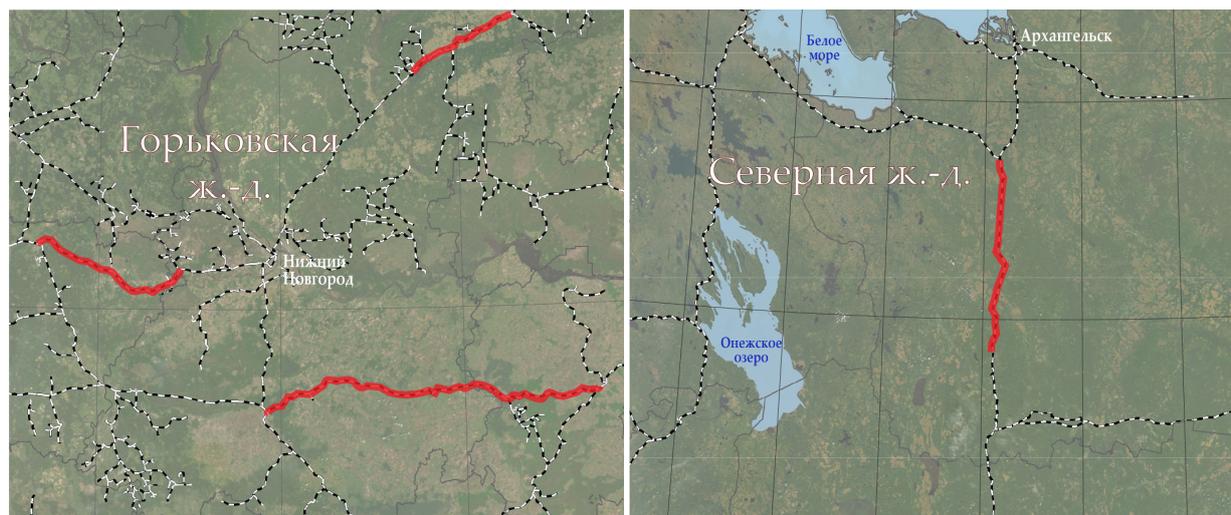


Рис. 5: Слева: Карта Горьковского отделения ж.-д. Красными линиями отмечены участки, на которых происходило наибольшее число отказов во время сильнейших магнитных бурь. Справа: Карта Северной ж.-д. Красным цветом показан выделенный участок, где наблюдались сбои в работе СЦБ системы во время сильных магнитных бурь. Карта скомпилирована по работам [Belov и др., 2007; Eroshenko и др., 2010].

ные магнитных станций в высокоширотной зоне РФ собраны в единую базу данных, описанную в работе [Козырева и др., 2022].

5.1 Примеры региональных возмущений геомагнитного поля во время периодов аномального поведения систем СЦБ на Северной ж.-д.

Информация с Северной ж.-д. о не имеющих явных внешних причин сбоях в работе рельсовых цепей сигнализации впервые поступила в апреле 2000 г. На рис. 5 (правая панель) отмечены участки, на которых отмечались сбои. Рельсовые цепи давали бессистемные сигналы о занятости путей длительностью до минуты. Проверка состояния рельсовых цепей не привела к выяснению причины подобных сбоев. Питающее напряжение по фидерам было в пределах нормы. Измерения на путевых реле в момент сбоев зафиксировали плавающее напряжение (от нормы 25 В до 6–7 В). При достижении величины 9–10 В путевое реле обесточивалось. Осмотр состояния рельсовых цепей на следующий день не обнаружил явных недостатков, могущих вызвать ложную занятость. Подобные явления происходили практически во время всех последующих больших магнитных бурь.

На рис. 6 приведено сопоставление геомагнитных вариаций на субавроральных (станция SOD) и средних (станция MOS) широтах со сбоями в работе сигнальной автоматики во время магнитной бури в ноябре 2003 г. с $|Dst| \sim 480$ нТл.

В рапортах указано местное время, но все геомагнитные данные и интервалы по сбоям на рисунках приведены к мировому времени (UT). Вместо 1-часового Dst индекса на графиках введен 1-мин аналог – SYM-H индекс. Магнитная буря началась в $\sim 08:00$ UT с прихода к земной магнитосфере межпланетной ударной волны, проявившейся на наземных магнитограммах в виде скачка геомагнитного поля SC. Главная фаза бури проявляется в резком падении С-Ю компоненты геомагнитного поля и росте по абсолютной величине SYM-H индекса, начавшихся в $\sim 12:00$ UT. Однако сбои в работе сигнальной автоматики проявились только с $\sim 14:00$ UT на фазе восстановления бури, когда на бухтообразные вариации магнитного поля наложился интенсивные иррегулярные P3 пульсации. Как отмечалось в разд. 2.2, с этими пульсациями зачастую связаны наиболее интенсивные всплески ГИТ.

В другом событии, в ночь с 6 на 7 апреля 2000 г., развивалась большая магнитная буря с $|Dst| \sim 200$ нТл, и сбои в рельсовых цепях совпали с ее наиболее возмущенным периодом. Во время бури произошло типичное расширение возмущенной области и аврорального овала к более низким широтам. В результате магнитная возмущенность на среднеширотной обсерватории BOR была даже выше, чем на более высокоширотных станциях LOZ, SOD (рис. 7). Сбои в работе сигнальной автоматики проявились в минимуме бухтообразных вариаций магнитного поля (ми-

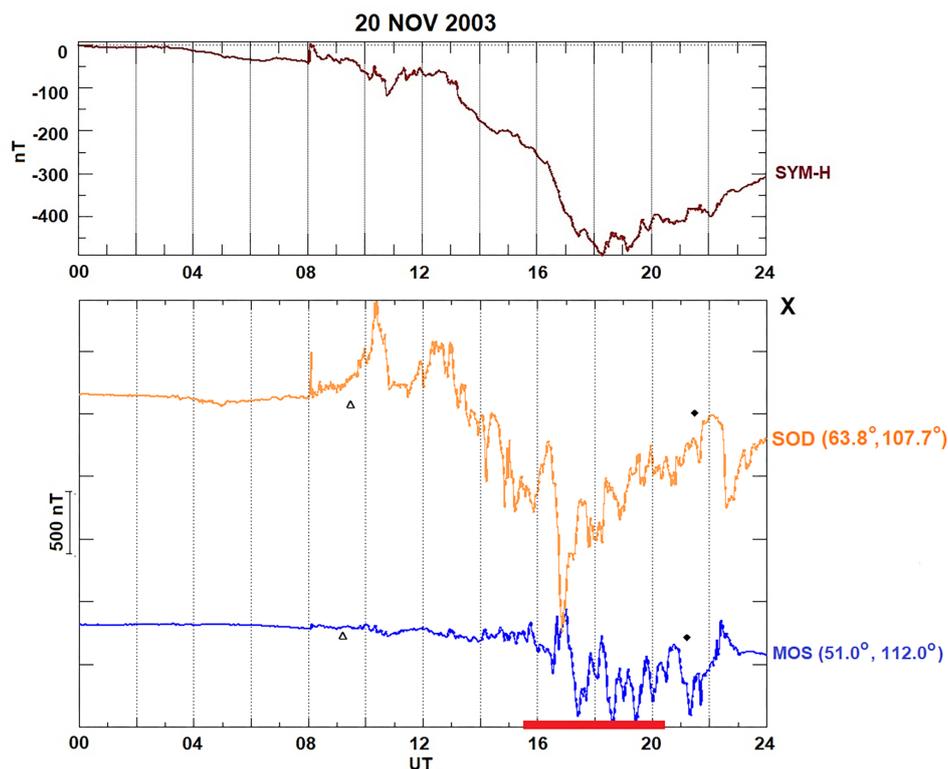


Рис. 6: Сопоставление геомагнитных вариаций (X -компонента) на субавроральных (SOD) и средних (MOS) широтах со сбоями в работе сигнальной автоматики на Северной ж.-д. (красная полоса) во время магнитной бури 20 ноября 2003 г. Верхняя панель показывает вариации геомагнитного SYM-H индекса, характеризующего интенсивность магнитной бури.

нимум SYM-H индекса) во время интенсивных иррегулярных $Pi3$ пульсаций. Сбои СЦБ системы, зарегистрированные во время магнитной бури, возникают в периоды наибольшей вариабельности геомагнитного поля (т.е. больших dB/dt) на среднеширотной станции BOR. Аналогичная картина наблюдалась во время других сильных бурь. Во время катастрофической бури 29–31 октября 2003 г. с $|Dst| \sim 400$ нТл на Горьковской ж.-д. также наблюдалась кратковременная ложная занятость станционных рельсовых цепей. Все сбои произошли на участках с электротягой переменного тока с дроссель-трансформаторами типа ДТ-1-150, оборудованных рельсовыми цепями с реле ДСШ. Эти события подтверждают то обстоятельство, что величина ГИТ и теллурических полей определяется не величиной общего возмущения поля, вызванного крупномасштабным ионосферным электроджетом, а вариабельностью магнитного поля, создаваемой мелкомасштабными токовыми системами в ионосфере.

Однако сбои в работе сигнальной автоматики могут возникать и при относительно умеренных магнитных возмущениях. рис. 8 показывает, что сбои в работе сигнализации возникли с на-

чалом изолированной суббури, развившейся на фоне слабой бури с $|Dst| \sim 60$ нТл 8 апреля 2001 г.

Интересный аспект воздействия магнитной возмущенности на работу ж.-д. сигнализации проявился во время умеренной магнитной бури с $|Dst| \sim 160$ нТл в июле 2004 г. на Северной ж.-д. Оказалось, что сбои в работе сигнализации могут вызываться не только суббурями с интенсивными $Pi3$ пульсациями, но и уединенными магнитными импульсами (рис. 9). Эти импульсы большой интенсивности (> 100 нТл) спонтанно возникают в ночные часы, как на фоне суббури, так и без нее.

Как оказалось, список сильных магнитных бурь в максимуме и на спаде цикла солнечной активности (2000–2005 гг.) практически полностью совпадает с периодами аномальных сбоев в работе железнодорожных СЦБ систем. Возможно, такие сбои происходили и на других участках, но такой документацией мы не располагаем. Анализ приведённых выше рисунков показывает, что моменты сбоев и нарушений приходятся на периоды магнитных бурь с наибольшей вариабельностью геомагнитного поля.

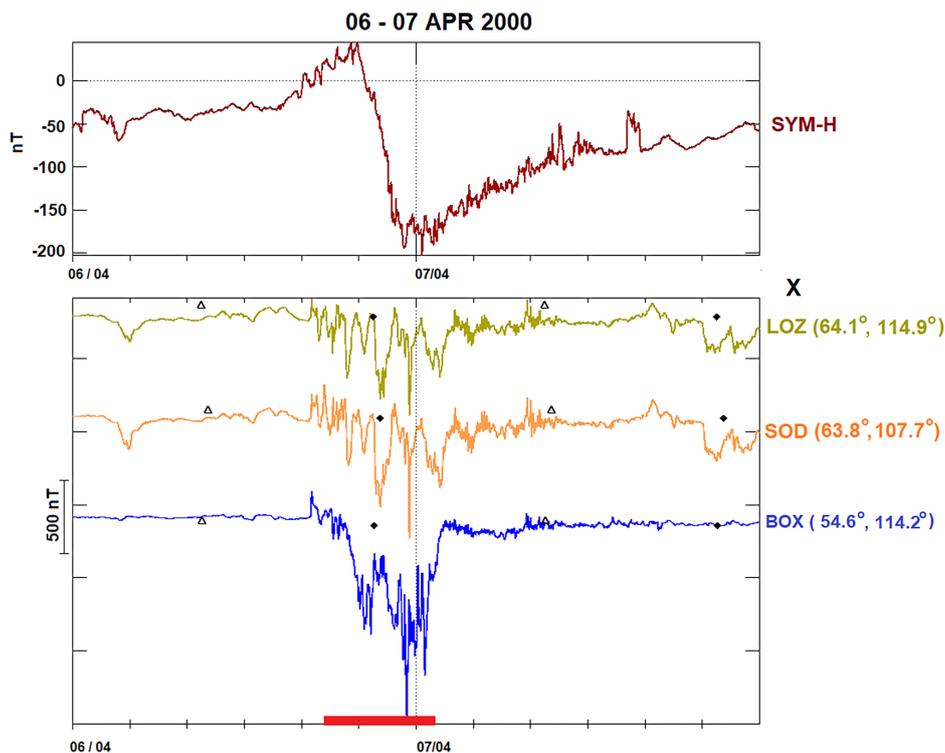


Рис. 7: Геомагнитно возмущенный период во время бури 6–7 апреля 2000 г., во время которого наблюдались сбои в работе СЦБ системы Северной ж.-д. Верхняя панель показывает вариации геомагнитного SYM-H индекса. Горизонтальная красная метка соответствует времени этих явлений.

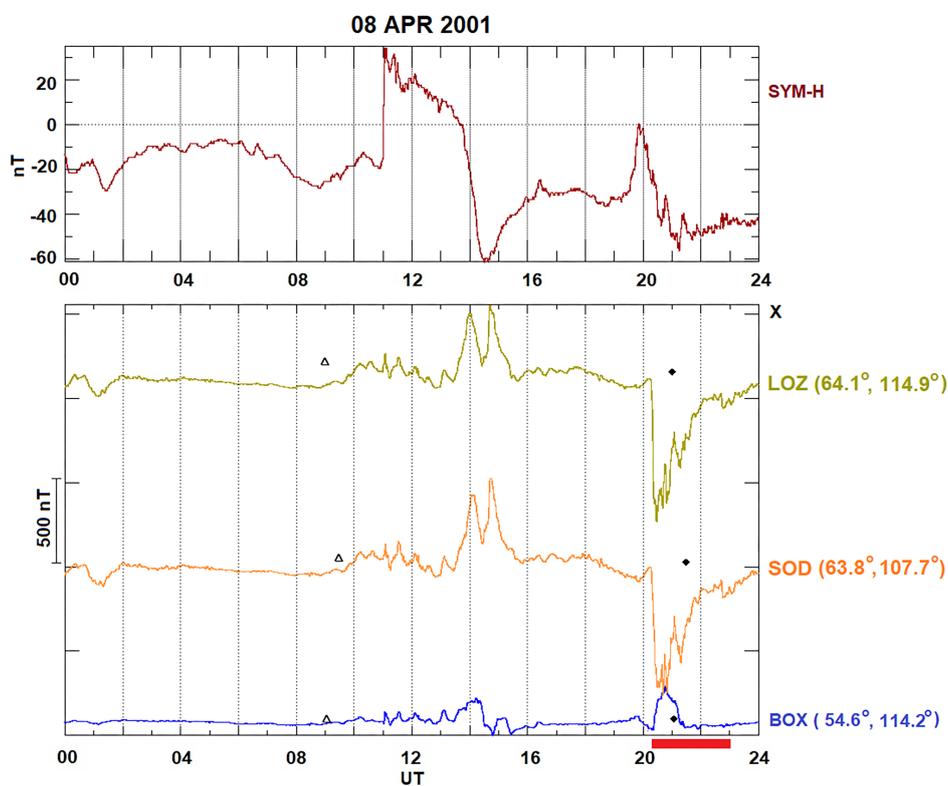


Рис. 8: Сбои в работе сигнализации Северной ж.-д. во время слабой бури 8 апреля 2001 г. Верхняя панель показывает вариации геомагнитного SYM-H индекса.

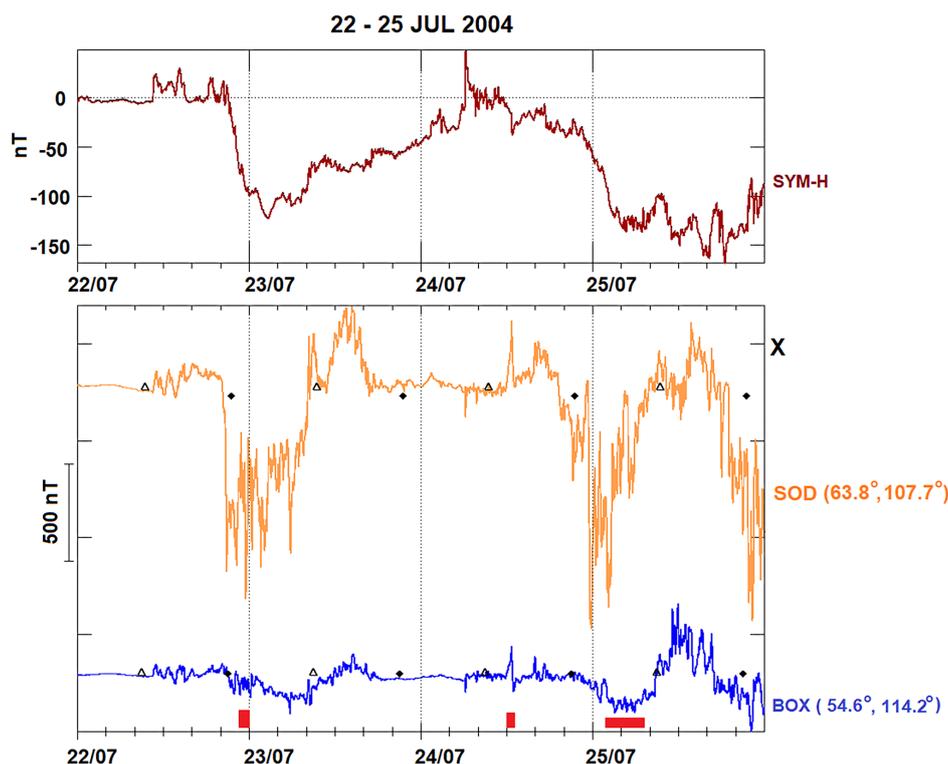


Рис. 9: Аномалии в работе ж.-д. сигнализации, возникшие во время суббурь и магнитных импульсов на фоне умеренной бури 22–25 июля 2004 г. на Северной ж.-д. (горизонтальные красные метки). Верхняя панель показывает вариации геомагнитного SYM-H индекса.

Причиной сбойных явлений, по всей вероятности, являются теллурические токи, наведенные во время значительного усиления геомагнитной активности. Возможные физические модели аномального поведения рельсовой автоматики рассмотрены в разд. 6. По-видимому, отличия в устройстве СЦБ систем на данных участках способствуют нестабильности в работе рельсовых цепей и её зависимости от геомагнитной обстановки, т.к. реакция на геомагнитные возмущения наблюдается именно на этих участках дороги, в то время как на дистанциях Москва – Коноша и Обозерская – Архангельск сбои не наблюдались. По-видимому, различия в устройстве СЦБ на участках Коноша – Няндомы и Няндомы – Обозерская являются одной из причин их различной реакции на геомагнитные возмущения. Кроме того, участок Няндомы – Обозерская более высокоширотный, и в этом районе вариации магнитного поля Земли более интенсивные. На тех участках, где дорога не электрифицирована, и тяговый ток и дроссель-трансформаторы не используются в системе сигнализации, не регистрировались случаи ложной занятости путей. Не исключено, что влияние ГИТ на работу системы автоматики происходит и во время умерен-

ных бурь. Так, выходное напряжение дроссель-трансформаторов, поступающее на светофоры, может плавать, и постоянные измерения его величины могли бы дать ценную информацию для моделирования влияния геомагнитной активности на наземные системы. Существенно снизить риск возможных ЧП на высокоширотных ж.-д. можно своевременным оперативным снабжением персонала прогнозами геомагнитной активности и информацией о текущей геомагнитной обстановке.

6 МОДЕЛИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА РАБОТУ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ РЕЛЬСОВОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

Большинство ж.-д. путей состоят из отдельных участков рельсовой цепи, изолированных от земли и друг от друга при помощи изолирующих стыков. Принципиальная схема работы железнодорожной сигнализации отдельного участка рельсовой цепи следующая: при отсутствии состава на путях сигнальный ток от источника питания, подключенного к рельсовым нитям, держит под напряжением путевое реле, также под-

ключенное к рельсовым нитям на противоположном участке рельсовой цепи. В результате на выходе системы сигнализации появляется сигнал «путь свободен». При появлении состава на путях основная часть сигнального тока пойдет через колесные пары, ослабив этим напряжение на путевом реле, что вызовет сигнал на выходе «путь занят». Обрыв рельса или другие проблемы рельсовой цепи должны также вызывать сигнал «путь занят». Оказывается, ГИТ также может вызвать изменение сигнального тока, что приводит к ложным сигналам о состоянии пути [Костроминов и Ложенкин, 2021].

Из принципиальной схемы работы ж.-д. рельсовой сигнализации (рис. 10) видно, что при идеальных условиях геомагнитная индукция создаст одинаковое напряжение на каждой рельсовой нити, что называется «помехой в синфазном режиме» [Ogunsola u Mariscotti, 2013]. Идеальные условия предполагают, что в рельсовой цепи нет обрыва рельса, утечек через изолированное соединение или балласт, вносящих асимметрию тока. Таким образом, симметричные рельсовые цепи с изолированными стыками в обоих рельсах не должны подвергаться влиянию теллурических токов от геомагнитных помех. Такие цепи характерны для неэлектрифицированных участков ж.-д. путей.

На электрифицированных участках для минимизации энергетических потерь необходимо обеспечить возможность возвращения обратного тягового тока на подстанцию, или, другими словами, замкнутость контура между подстанцией и электровозом. В роли обратного «отсасывающего» провода чаще всего выступают рельсовые нити. Для этих целей одна из рельсовых нитей может монтироваться без изолирующих стыков, образуя единый проводник от электровоза до тяговой подстанции (S-рельс), а вторая рельсовая нить – с изолирующими стыками (I-рельс) (рис. 11). Такая схема реализована в некоторых

европейских государствах. На территории России преимущественно распространена другая система организации «отсасывающей» линии – при помощи дроссель-трансформаторов (ДТ). При этом рельсовые цепи разделены изолирующими стыками на обеих рельсовых нитях, а обратный тяговый ток проходит на соседнюю рельсовую цепь через перемычку, между серединами основных обмоток ДТ соседних рельсовых цепей (рис. 12). В обеих схемах проблемы сигнализации возникают из-за асимметрии токового контура сигнального тока рельсовой цепи. Причинами асимметрии могут быть несовершенство стыков между отдельными рельсами, повышенная проводимость через шпалы и балласт на землю из-за загрязнения или погодных условий, неисправность изолирующего стыка, и т.д.

Первые попытки описать воздействие внешних теллурических полей на рельсовые цепи с постоянным сигнальным током и электрически-непрерывным рельсом предпринимались в Швеции еще в 1956 г. [Alm, 1956]. Для выявления потенциально-уязвимых участков необходимо построение модели, позволяющей количественно оценить влияние геомагнитных возмущений на объекты ж.-д. инфраструктуры. Дополнительную неопределенность в модель вносят параметры, сильно зависящие от внешних условий, такие как удельная проводимость между рельсом и землей через шпалы и балласт, которая значительно возрастает в дождливую погоду или при сильном загрязнении.

В работе [Boteler, 2021] представлена модель воздействия теллурических полей на участок рельсовой цепи, работающий по схеме с электрически-непрерывным рельсом (рис. 13). В модели использована схема, которая применялась на железных дорогах Швеции в 1956 г., поэтому данная модель служит только для иллюстрации возможных эффектов. При расчетах была применена П-образная схема замещения, ко-

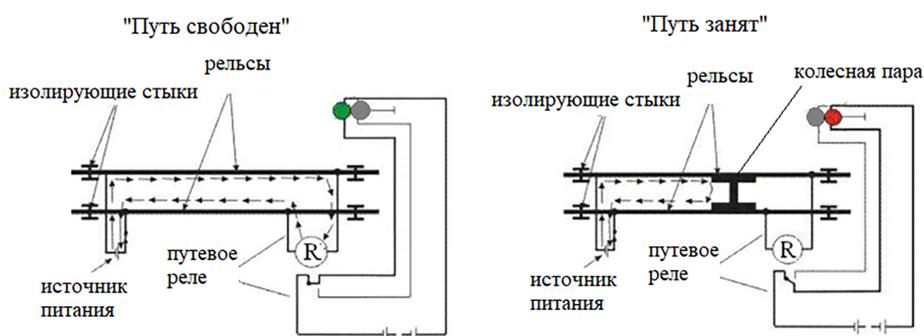


Рис. 10: Принципиальная схема работы ж.-д. рельсовой сигнализации.



Рис. 11: Схема автоматики с электрически-непрерывным рельсом.

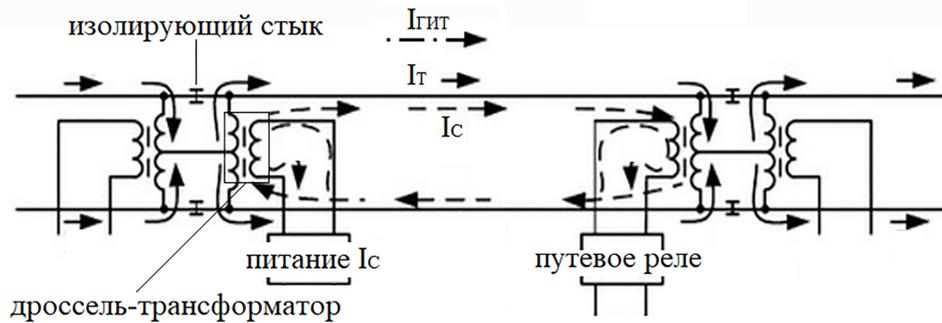


Рис. 12: Схема токов в рельсовой цепи с дроссель-трансформаторами.

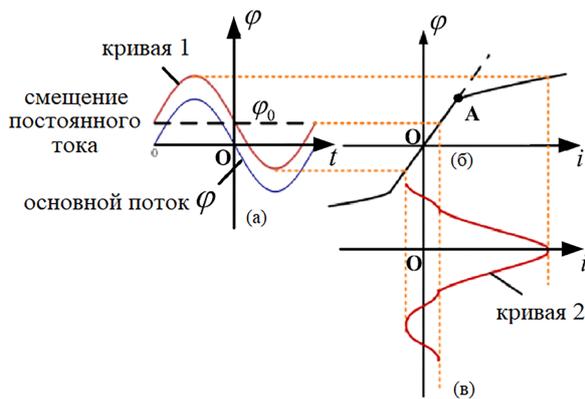


Рис. 13: Схема работы дроссель-трансформатора со смещением постоянного тока.

торая широко распространена для расчета ГИТ в протяженных ЛЭП. Затем в «телеграфные уравнения» для длинной линии вносится дополнительный источник ЭДС, связанный с геомагнитными возмущениями. После этого, с использованием эквивалентной схемы и законов Кирхгофа, получена система линейных уравнений, описывающая токи и напряжения на каждом участке цепи. Решение этой системы дает пороговое значение возмущения геомагнитного поля, при котором возможны ложные сигналы при заданных параметрах рельсовой цепи. Зависимость тока реле от геоэлектрического поля имеет следующий характер: когда геоэлектрическое поле равно нулю, ток через реле выше «притягивающего» тока, поэтому реле активируется, устанавливая сигнал «путь свободен». При отрицательных значениях геоиндуцированного электрического поля ток в рельсовой цепи уменьшается. Когда ток в реле уменьшается ниже предельного, реле отключается, устанавливая сигнал «путь занят». Такой отказ прерывает нормальную работу ж.-д. путей, хотя и не создает угрозы безопасности. В ситуации, когда поезд зашел на рельсовую цепь, а геоэлектрическое поле равно нулю, ток реле будет нулевым, так как колесная пара поезда замыкает электрическую цепь в обход реле. Соответственно реле отключится, а сигнал будет верно установлен на «путь занят». При ненулевом значении геоэлектрического поля через реле будет

протекать ток, и если амплитуда геоэлектрического поля такова, что ток реле превысит порог срабатывания, реле активируется, неправильно установив сигнал «путь свободен». Приведенный анализ рассматривает реле, которое активируется током в любом направлении. В некоторых рельсовых цепях используют поляризованные реле, которые активируются только направлением тока, создаваемым силовым блоком рельсовой цепи. В этом случае только геоэлектрическое поле выше порогового активирует реле, устанавливая сигнал «путь свободен». Такой отказ является наиболее опасным, поскольку он позволяет следующему поезду зайти на уже занятый участок пути.

Рассмотрим модель воздействия геоиндуцированных теллурических полей на ж.-д. сигнализацию в схеме с ДТ. Эта модель актуальна, поскольку в разделе 5 указано, что уязвимыми для геомагнитных воздействий оказались участки Северной ж.-д., где использовались ДТ-1-150 и не было дополнительного экранирующего кабеля для обратного тягового тока. В схожей модели [Qian и др., 2016] рассматривается влияние теллурических полей на работу сигнальной системы переменного тока (25 Гц) в рельсовой цепи с ДТ и переменным тяговым током (50 Гц). В такой схеме наведенный в результате асимметрии рельсовых нитей ГИТ будет протекать тем же путем, что и обратный тяговый ток: по рельсовым нитям, обмоткам ДТ и перемычке между серединами обмоток ДТ текущей и соседней рельсовой цепи. Во время нормальной работы ДТ находятся в линейном режиме, а их рабочая точка – на участке кривой «ОА» намагничивания сердечника в «точке А» (рис. 13). Если ГИТ течет в обмотках трансформатора, он создает постоянный магнитный поток φ_0 в ДТ, который накладывается на основной поток φ , поэтому кривая потока смещается, и амплитуда тока в полупериоде волны резко увеличивается. Это приводит к работе ДТ в нелинейном режиме, искажая форму сигнала на выходе ДТ, что вызывает изменение амплитуды и фазы сигнального тока, и поэтому может повлиять на показания системы сигнализации. При параметрах рельсовой цепи, когда сопротивление утечки 1 Ом, а сопротивление на единицу длины рельсов 0,2 Ом/км, ГИТ, наведенный разницей потенциалов в 1 В/км будет порядка 8 А [Qian и др., 2016]. Для высоких широт наведенная разница потенциалов может быть более 10 В/км, тогда, при допустимой 4% асимметрии тягового тока, индуцированный ток в обмотках ДТ будет $\geq 4-5$ А. Этого достаточно для изменения сигнального тока ниже пороговых величин удержания контакта путевого реле. Модели-

рование работы рельсовой сигнализации под действием ГИТ на ж.-д. Великобритании по методу [Boteler, 2021] показало, что нарушения в работе реле могут возникать при индуцированных теллурических полях $\sim 4-5$ В/км [Patterson и др., 2023].

Анализ моделей работы рельсовых реле при внешних теллурических полях показал, что основной причиной их воздействия на системы ж.-д. сигнализации является асимметрия токовых характеристик рельсовых цепей. Поэтому мероприятия для минимизации воздействия геомагнитных возмущений на ж.-д. сигнализацию должны быть направлены на уменьшение асимметрии электромагнитных параметров рельсовой цепи. Это может быть достигнуто включением дополнительного «отсасывающего» кабеля в схему или уменьшением предельно допустимой асимметрии обратного тягового тока в рельсовой цепи.

Приведенные выше примеры – не единственно возможные схемы организации ж.-д. сигнализации. В настоящее время могут использоваться более сложные кодированные рельсовые цепи, которые не только обнаруживают поезд, но и передают информацию машинисту о допустимой скорости. Использование звуковых частот для рельсовых цепей переменного тока означает, что они не должны реагировать на напряжения постоянного тока, будь то паразитные токи от других ж.-д. систем или геомагнитные возмущения. Обнаружение поездов также может осуществляться с помощью счетчиков осей, которые обнаруживают прохождение колес мимо датчика на стороне пути. Поскольку они не используют сигналы на рельсах, на них не действуют напряжения, вызванные геомагнитными возмущениями. Таким образом, первым шагом в оценке потенциального риска геомагнитных возмущений для ж.-д. сигнализации является определение того, на каких магистралях используются определенные типы рельсовых цепей, поскольку реакция на геомагнитные помехи сильно зависит от конкретных деталей таких цепей.

7 Деградация сигналов глобальных навигационных спутниковых систем

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) используют передачу сигнала в диапазоне от единиц до десятков ГГц от магнитосферного спутника. Современные системы навигации основаны на использовании нескольких систем: GPS (США), ГЛОНАСС (РФ), Galileo (Ев-

росоюз), BeiDou/Compass (КНР). Максимальное количество навигационных спутников сосредоточено в районе геостационарной орбиты (расстояние до центра Земли $6,6 R_E$, где R_E – радиус Земли) и на менее высоких орбитах. Таким образом, орбиты навигационных спутников находятся в сердцевине внешнего радиационного пояса, и спутниковая электроника подвергается воздействию релятивистских электронов. Но полное количество навигационных спутников в настоящее время настолько велико, что повреждение, или даже потеря одного из них, может только незначительно сказаться на качестве навигации в большинстве районов. Тем не менее, вопрос о росте ошибки, связанной с уменьшением числа спутников для конкретной точки приема, требует отдельного исследования, как и моделирование потери сигнала одновременно на нескольких спутниках в условиях экстремальных возрастаний потока электронов.

В режиме автономной навигации погрешность позиционирования составляет единицы метров. Физические механизмы влияния возмущений космической погоды на точность приема навигационного сигнала укладываются в следующие основные группы [Демьянов и Ясюкевич, 2014]:

1. Ухудшение отношения сигнал-шум из-за природных шумов в рабочем диапазоне излучателя;
2. Повреждение передающей аппаратуры потоками быстрых заряженных частиц;
3. Ионосферные возмущения на пути распространения сигнала от передатчика к приемнику.

Источником первой группы искажений являются возрастания потока солнечного радиоизлучения во время вспышек. Повреждения аппаратуры на магнитосферных спутниках связаны с возрастаниями потоков быстрых заряженных частиц как солнечного, так и магнитосферного происхождения. Максимальные амплитуды ионосферных неоднородностей связаны с зоной полярных сияний, и прежде всего их дискретных форм. Таким образом, возможные космические источники ошибок в работе навигационного оборудования связаны с солнечными вспышками, солнечными протонными событиями, возрастаниями потоков релятивистских электронов в магнитосфере и мощными авроральными возмущениями [Warnant и др., 2007]. Наиболее сильно эффекты, связанные с частицами и ионосферными неоднородностями, проявляются во время сильных магнитных бурь, когда не только растут амплитуды возмущений, но и происходит смещение

максимума возмущений в область средних широт [Афраймович и Первалова, 2006].

7.1 Деградация сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, связанная с солнечными радиовспышками

Солнце является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот, включая и диапазон сигналов ГНСС (1–2 ГГц), что приводит к ухудшению соотношения сигнал/шум при приеме сигнала. Статистический анализ влияния солнечных вспышек на отношение сигнал/шум показал, что наиболее уязвимыми оказываются приемники, работающие на частотах L2/L5, а отношение на L1 меняется мало [Sato и др., 2019]. При этом увеличение числа спутников для этого вида помех не приводит к существенному улучшению ситуации, т.к. рост шума, связанного со вспышкой, действует одновременно на все видимые спутники. Существенное улучшение отношения сигнал/шум происходит за счет увеличения мощности полезного сигнала на новых поколениях спутников, что позволяет им сохранить работоспособность для вспышек с потоком радиоизлучения $> 2 \times 10^4$ с.е.п., которые наблюдаются до нескольких раз в год в зависимости от фазы солнечного цикла. Сравнительный анализ влияния вспышек 2011 и 2017 гг. показал существенное ослабление влияния вспышек солнечного радиоизлучения на новые системы [Yasyukevich и др., 2021].

Влияние вспышек на функционирование ГНСС имеет ярко выраженную частотную зависимость, что приводит к ситуации, когда устройства, работающие в двух диапазонах, оказываются более уязвимыми, чем использующие только частоту L1. Зависимость от зенитного угла Солнца приводит к наибольшему эффекту от солнечных вспышек на низких широтах в околополуденные часы. При этом экстремальные радиовспышки с потоком $> 8 \times 10^4$ с.е.п. остаются опасными и для современных систем на всех широтах и приводят к серьезной деградации в работе GPS и ГЛОНАСС [Афраймович и др., 2009]. Такие экстремальные события способны вызвать не только ухудшение отношения сигнал/шум, но и срывы сопровождения сигналов спутников [Afraimovich и др., 2009]. Во время вспышки в декабре 2006 г. отношение сигнал/шум на всех широтах упало больше чем на 10 дБ, а для отдельных локаций – на 25 дБ. Максимальные ошибки позиционирования составили 20 м в горизонтальном направлении и 60 м – в вертикальном.

Увеличение мощности сигнала на современных спутниках привело к тому, что солнечные ра-

диовспышки умеренной интенсивности вызывают ошибки, не превышающие 2 м. Однако, экстремальные вспышки, происходящие в среднем 1–2 раза за десятилетие, вызывают существенные ошибки позиционирования, и даже потерю сигнала. Задача прогноза экстремальных вспышек солнечного радиоизлучения хотя и является предметом интенсивного исследования, до сих пор полностью не решена.

7.2 Влияние ионосферных неоднородностей на работу навигационных систем

Резкое изменение магнитосферы при приходе выбросов солнечной плазмы или перестройка магнитосферы в результате суббури приводят к усилению переноса плазмы в околоземной среде и росту амплитуды электромагнитных волн в широком диапазоне частот. Околоземная плазма является бесстолкновительной, и обмен энергией между частицами разных энергий происходит благодаря их резонансному взаимодействию с волнами разных типов. Магнитосферная волновая активность приводит к изменениям в потоках заряженных частиц и их выпадению в ионосферу. При этом возникают резкие пространственные неоднородности в ионосферной плазме. Наиболее важным для распространения радиоволн эффектом являются ионосферные мерцания [Kintner *u др.*, 2007]. Максимальные эффекты мерцаний наблюдаются вблизи экватора и вблизи аврорального овала. Для российских условий из этих областей важна зона вблизи экваториальной границы аврорального овала, которая в зависимости от интенсивности возмущений может смещаться от авроральных широт к средним [Afraimovich *u др.*, 2009]. Максимальные возмущения обычно соответствуют главной фазе магнитной бури [Astafyeva *u др.*, 2014]. Мерцания амплитуды и фазы сигнала возникают в результате рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации с размерами порядка радиуса первой зоны Френеля (для ГНСС это первые сотни метров). Мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации наблюдаются практически всегда в высокоширотной ионосфере, а во время интенсивных геомагнитных возмущений их амплитуда возрастает в широком диапазоне масштабов [Афраимович и Перевалова, 2006].

Эффект магнитных бурь не сводится только к увеличению интенсивности и смещению на более низкие широты. Это смещение создает в магнитосфере пространственное наложение структур, которые в условиях умеренной возмущенности разделены, что приводит к тому, что во вре-

мя сильных магнитных бурь ошибки позиционирования ГНСС на средних широтах многократно превышают ошибки на авроральных широтах во время умеренных возмущений. Так во время сильной геомагнитной бури в ноябре 2004 г. [Basu *u др.*, 2008] территория США на средних широтах попала в зону с ошибкой вертикального позиционирования для гражданских самолетов > 45 м.

Несмотря на увеличение отношения сигнал/шум на новых поколениях спутников и улучшение используемых моделей первичной обработки сигнала, нельзя исключать нелинейного влияния экстремальных бурь на устойчивость работы ГНСС, приводящее к потере сигнала от одного или нескольких спутников. Экстремальные бури, хотя и являются редким явлением, и могут, как во время слабого 24-го цикла, дать человечеству передышку в два десятилетия, неизбежно повторяются, а связанные с ними проблемы должны заранее учитываться на стадии разработки технологических решений.

8 ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА КАК НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНОГО РАЙОНА ИНТЕНСИВНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ДЕГРАДАЦИИ СИГНАЛОВ ГНСС

Для всех катастрофических геофизических событий оценка их вероятности и вызванных ими последствий может быть проведена лишь с конечной точностью в пространстве и во времени. Однако возможны оценки, аналогичные сейсмическому районированию, дающие общее представление о том, где стоит ожидать максимальной интенсивности геомагнитных возмущений. Наибольшая интенсивность возмущений наблюдается в периоды высокой солнечной активности на авроральных широтах, т.е. вблизи овала полярных сияний. Сама возможность прогноза связана с тем, что от возникновения активной области на Солнце до прихода связанного с ней возмущения к Земле проходит конечное время. Таким образом, первую линию прогноза дают оптические наблюдения Солнца, которые позволяют предсказать возможное возмущение за время переноса плазмы солнечного ветра к границе земной магнитосферы (порядка 3 дней). Но абсолютно точно предсказать, достигнет ли вызванное вспышкой возмущение солнечного ветра земной магнитосферы, пока невозможно. Краткосрочный (1–3 часа) прогноз обеспечивается за счет мониторинга межпланетного пространства аппаратурой, установленной на спутниках, нахо-

дящихся в точке либрации на расстоянии около полутора миллионов километров от Земли. В результате по основным параметрам, определяющим эффективность передачи энергии от солнечного ветра в магнитосферу, таким как ориентация межпланетного магнитного поля и динамическое давление солнечного ветра, можно предсказать возможное возникновение магнитной бури. Однако интенсивность бури не может быть точно предсказана на основе анализа текущих значений параметров межпланетной среды. Это связано со способностью магнитосферы запасать энергию, которая затем освобождается в виде авроральных суббурь и усиленной конвекции околоземной плазмы. Еще в меньшей степени могут быть предсказаны характеристики возмущенности в конкретной области на земной поверхности, так как они определяются большим числом факторов.

Наиболее активные проявления космической погоды, такие как перегрузка энергетических линий, сбои коротковолновой радиосвязи, и пр., наблюдаются в области овала полярных сияний (аврорального овала), особенно его экваториальной границы. Для этой области характерно высыпание авроральных частиц, наличие резких градиентов и высокого уровня турбулентности ионосферной плазмы, что провоцирует сбои и снижает устойчивость ГНСС [Захаров и др., 2020]. При расширении аврорального овала на средние широты в этот же регион смещается область повышенных погрешностей позиционирования [Afraimovich и др., 2009; Yasyukevich и др., 2020].

Для мониторинга и оперативного прогноза динамики аврорального овала при изменениях космической погоды необходима адекватная модель. Погодно-независимыми источниками информации о структуре аврорального овала являются измерения на низкоорбитальных спутниках потоков авроральных электронов, вызывающих полярные сияния. Данные регистрации потоков частиц на спутниках не зависят от освещенности ионосферы и облачности атмосферы, доступны для обоих полушарий, и более чувствительны, чем наземные или спутниковые оптические наблюдения. На основании более 20 лет наблюдений потоков электронов и протонов разных энергий на спутниках DMSP была построена модель аврорального овала OVATION-prime (OP) (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/modelinfo.php?model=Ovation%20Prime>). Модель OP параметризована на значения параметров солнечного ветра и рассчитывает ожидаемое 2D пространственное распределение интенсивности основных типов высыпаний ав-

роральных электронов и протонов [Newell и др., 2014]. В модели использована ранее установленная статистическая связь между параметрами межпланетной среды и динамикой аврорального овала. Эмпирическая модель OP позволяет рассчитать зависимость между интенсивностью авроральных высыпаний и интенсивностью аврорального свечения, при этом все типы полярных сияний объединяются для составления карт суммарной мощности свечения.

В разработанном для нужд РЖД сервисе <http://aurora-forecast.ru> задача визуализации пространственного распределения вероятности наблюдения полярных сияний решена посредством разработанной веб-ориентированной системы [Vorobev и др., 2020]. Веб-сервис для визуализации вероятности появления полярных сияний основан на статистической модели авроральных высыпаний OP. Входными параметрами являются данные в реальном времени по солнечному ветру и межпланетному магнитному полю со спутников, передаваемые по протоколу FTP и доступные на сайте NASA. Сдвиг по времени (~ 1 часа) за счет распространения солнечного ветра от межпланетного спутника к границе магнитосферы дает принципиальную возможность краткосрочного прогноза ожидаемой интенсивности полярных сияний.

В качестве примера на рис. 14 показано предсказанное положение и интенсивность овала полярных сияний для магнитной бури 4 февраля 2022 г. Эта буря примечательна тем, что в процессе ее развития космическая миссия StarLink потеряла 40 из 49 запущенных спутников из-за влияния космической погоды. Мгновенное положение аврорального овала на виртуальном глобусе наложено на карту основных ж.-д. магистралей РФ. Система показывает, что во время этой бури положение аврорального овала частично захватывает высокоширотные участки ж.-д. магистралей.

9 СОЗДАНИЕ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ НУЖД РЖД

Основная проблема в изучении воздействия космической погоды на технологические системы состоит в отсутствии общедоступной для научного анализа информации о нарушениях в работе космических и энергетических систем, газопроводов и железнодорожного транспорта. Промышленные компании во всем мире крайне неохотно предоставляют сведения об имевших место сбоях и аномалиях в работе своих систем мировому на-

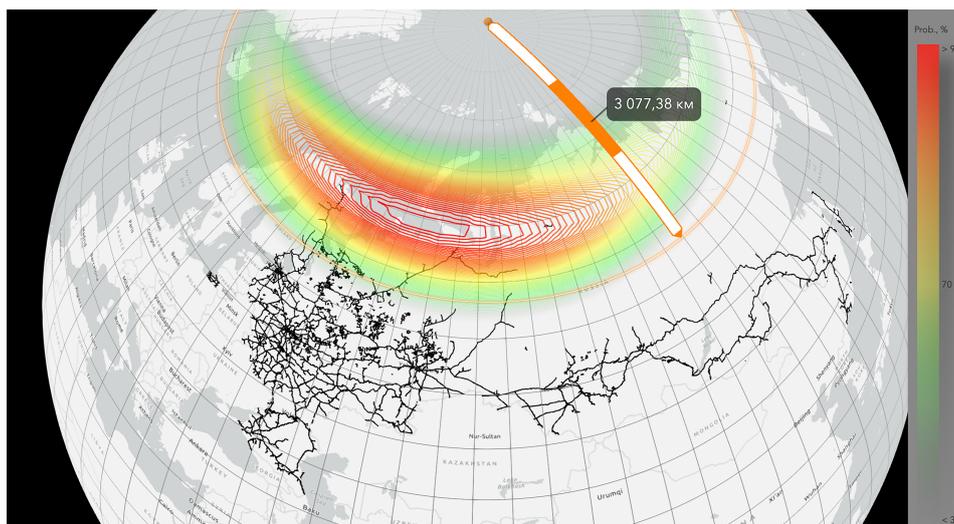


Рис. 14: Пример визуализации краткосрочного прогноза вероятности видимости полярных сияний для северного полушария для 17.02.2022 г., 18:30 UT во время магнитной бури с авроральным индексом $AE = 1450$ нТл. Мгновенное положение аврорального овала на виртуальном глобусе наложено на карту основных железнодорожных магистралей РФ. Стрелка показывает расстояние от экваториальной границы аврорального овала до северного географического полюса.

учному сообществу. Это делает особенно ценными немногие доступные для анализа измерения ГИТ в технологических системах.

9.1 Приборная база, необходимая для системы мониторинга и регистрации ГИТ в ЛЭП

Воздействие космической погоды на технологические системы железных дорог может проявляться в нарушениях электроснабжения. Можно предположить наличие связи нарушений в работе сигнальной автоматики с качеством поставляемой электроэнергии. Отсюда следует, что регистрация ГИТ, возбуждаемых в ЛЭП, поставляющих энергию на подстанции железных дорог, позволит контролировать качество поставляемой электроэнергии. Измерения ГИТ методом регистрации тока в нейтрали силового трансформатора были реализованы на Кольском полуострове и в Карелии в ЛЭП «Северный Транзит» [Сахаров и др., 2016]. Для этих измерений был разработан специальный датчик, включенный в распределенную систему регистрации, что позволило проводить измерения в режиме почти реального времени.

Альтернативным способом измерения ГИТ в ЛЭП является метод дифференциальных магнитных измерений. Преимуществом метода является дистанционный характер измерений, при котором нет необходимости в установке аппаратуры, электрически связанной с энергооборудованием. При использовании этого метода ГИТ

в проводах ЛЭП оценивается по разнице между магнитными записями, сделанными непосредственно под ЛЭП, и на некотором расстоянии. Поскольку прямое измерение ГИТ на трансформаторной подстанции как правило встречается с противодействием энергетических компаний, то косвенный метод дифференциальных измерений оказывается единственно возможным. Этот метод с помощью разнесенных на 40 км магнитометров был применен для измерения ГИТ в линии 400 кВ в сети Финляндии и газопроводах [Viljanen и др., 2006]. Сравнительный анализ данных регистрации ГИТ в линиях поставки электроэнергии с данными о нарушениях в работе систем автоматики на ж.-д. пока нигде не проводился.

В настоящий момент нет данных о промышленно выпускаемом отечественном оборудовании для контроля за ГИТ в промышленных трансформаторах. Возможный комплект оборудования для регистрации ГИТ в нейтрали трансформатора и качества электроэнергии по составу гармоник должен включать устройство регистрации тока в глухозаземленной нейтрали трансформатора с системой сбора и передачи информации. Дополнительным методом контроля нарушений, вызываемых геомагнитными возмущениями, может быть устройство для регистрации уровня гармоник промышленной частоты на трансформаторе тока, установленном в цепи фазы трансформатора.

9.2 Задачи по организации прогнозной информацией эксплуатационных служб РЖД

К настоящему времени космическая геофизика достигла уровня, позволяющего ставить вопрос о реальном прогнозе космической погоды. Задачей исследования космической погоды, с одной стороны, является выявление связей между солнечной активностью и процессами, происходящими в межпланетном пространстве, магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли, а с другой – анализ влияния этих процессов на техногенные системы. Космическую погоду в основном определяют солнечные вспышки, корональные выбросы массы и высокоскоростные потоки плазмы из солнечных дыр. Системы мониторинга должны давать операторам энергетических и транспортных систем оперативную информацию при помощи следующих научных установок:

- о солнечных вспышках и радиовспышках (солнечные телескопы и спутниковые детекторы);
- о потоках солнечной плазмы и ориентации межпланетного магнитного поля перед магнитосферой Земли (спутники в точке либрации);
- о вариациях геомагнитного поля на земной поверхности, как в планетарном масштабе, так и в заданном регионе (сеть наземных магнитометров);
- об интенсивности и положении овала полярных сияний (наземные фотометры и детекторы частиц на низкоорбитальных спутниках).

Лица, принимающие решения, должны быть информированы обо всех проявлениях космической погоды.

Несмотря на мощный арсенал современной космической геофизики – солнечные телескопы, космические станции между Землей и Солнцем, десятки спутников на разных орбитах, сети наземных радаров и магнитометров, и т.п. – проблема мониторинга и прогноза состояния околоземного космического пространства не свелась к «чисто инженерной», и многие фундаментальные вопросы остаются нерешенными.

Основное препятствие для изучения геомагнитных рисков для технологических систем связано с крайне низкой плотностью авроральных станций в Российской Арктике. Так, если в Северной Америке и Канаде среднее расстояние между авроральными станциями вдоль долготы составляет 13° , а в Финляндии и Скандинавии $< 3^\circ$, то для

России это расстояние $> 24^\circ$, то есть, при имеющейся плотности сети, часть активизаций геомагнитного поля не может быть зафиксирована. Поэтому самым простым и дешевым методом мониторинга авроральных возмущений представляется расширение сети магнитных станций в Арктической зоне РФ на широтах от 50° , что соответствует положению овала полярных сияний при максимальных возмущениях.

Российский север является областью наложения экстремальных условий как природной (космическая погода, метеоусловия, резкие неоднородности геоэлектрической структуры), так и техногенной (большие протяженности систем) природы. Для этого региона необходим учет даже маловероятных неблагоприятных факторов и мониторинг критически важных параметров космической и обычной погоды, учитывая особые трудности ремонта.

Оптимальная схема мониторинга должна включать независимый от иностранных баз данных постоянный контроль за солнечной активностью, параметрами межпланетной среды в точке либрации, потоками энергичных частиц в магнитосфере на геостационарной орбите, мониторинг аврорального овала и ионосферной плазмы низкоорбитальными спутниками, а также магнитного поля и метеорологических параметров, включая молниевые разряды, на поверхности Земли. Вся эта информация в реальном времени должна стекаться в единый центр прогноза космической погоды. Прообразом такого центра могут служить центры космической погоды NOAA (<https://www.swpc.noaa.gov>) и ИЗМИРАН (<http://spaceweather.izmiran.ru>). Хорошим примером служит разработка индекса полярной магнитной активности (PC индекс), который служит показателем поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра, обуславливающей развитие магнитных бурь и суббурь [Трошичев и Сормаков, 2021]. PC индекс рассчитывается по данным станций Восток (Антарктика) и Туле (Гренландия) в реальном времени (<http://pcindex.org>), что определяет возможность использования индекса в целях прогноза развития магнитных суббурь. Обнадеживающим фактором явился запуск в 2021 г. гидрометеорологического спутника Арктика-М на высокоэллиптическую орбиту. Спутники этой орбитальной группировки дистанционного зондирования Земли будут в непрерывном режиме осуществлять обзор северных территорий РФ и Арктики. Спутник ведет непрерывную съемку Земли в десяти спектральных диапазонах с разрешением на поверхности от 1 до 4 км, а точность измерения температуры подстила-

ющей поверхности достигает 0,1–0,2°C. Кроме того, на космическом аппарате «Арктика-М» установлен гелиогеофизический комплекс для мониторинга космической погоды, который измеряет магнитное поле и радиационную обстановку в околоземном пространстве, ведет съемку полярных сияний.

В настоящее время невозможно оценить все возможные аспекты влияния космической погоды на жизнедеятельность человечества, т.к. многие фундаментальные проблемы остаются невыясненными. Хотя исследования связи космической погоды и метеорологических процессов ведутся уже более полувека, косвенное влияние космической погоды на работу технологических систем через метеопараметры изучено слабо. В частности, установлено влияние галактических и солнечных космических лучей с энергиями ≥ 1 МэВ на метеорологические процессы – образование облачности и модуляция грозовой активности.

Другой аспект связан с влиянием изменений космической погоды на отклонения в нормальной жизнедеятельности человека [Птицына и др., 1998]. Хотя скопилось множество статистически достоверных доказательств влияния Солнца на биосферу, но теории, на основании которой можно было бы удовлетворительно объяснить всю совокупность имеющихся экспериментальных данных, на данный момент не существует. Механизмов воздействия космической погоды на биосферу может оказаться немало в силу сложности и недостаточной изученности проблемы. Тем не менее, нельзя исключить негативное воздействие магнитных бурь на машинистов и операторов ж.-д. магистралей на высоких широтах.

10 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы надежности работы ж.-д. инфраструктуры и ее защиты от воздействий космической погоды приобретают особое значение в связи с назревшей необходимостью строительства Северного широтного хода (СШХ). Эта магистраль протяженностью более 700 километров свяжет западную и восточную части Ямало-Ненецкого автономного округа, а Северную ж.-д. – со Свердловской, и составит основу транспортной инфраструктуры центральной части Арктической зоны РФ. Поскольку эта магистраль будет проходить в области авроральных и субавроральных широт, то на надежность ее работы особое влияние будут оказывать различные проявления космической погоды, рассмотренные в данном обзоре. В этой связи необходимо организовать опытный район для проведения более детальных исследо-

ваний влияния космической погоды на технологическую железнодорожную радиосвязь, системы ж.-д. автоматики и электроснабжения. Поскольку реакция на возмущения космической погоды сильно зависит от условий эксплуатации, разработка методов оценки риска должна проводиться в сотрудничестве геофизиков с инженерами-эксплуатационниками.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта РФФ 21-77-30010. Выражаем благодарность рецензентам за конструктивные замечания.

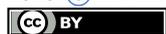
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э. Л., Гаврилюк Н. С., Демьянов В. В. и др. Сбои функционирования спутниковых навигационных систем GPS-ГЛОНАСС, обусловленные мощным радиоизлучением солнца во время солнечных вспышек 6, 13 декабря 2006 г. и 28 октября 2003 г. // Космические исследования. – 2009. – Т. 47, № 2. – С. 146–157.
- Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. – Иркутск : Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – С. 479.
- 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](https://doi.org/10.12737/szf-33201705).
- Благовещенский Д. В. Влияние геомагнитных бурь/суббурь на распространение КВ (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 4. – С. 435–450. – DOI: [10.7868/S0016794013040032](https://doi.org/10.7868/S0016794013040032).
- Вахнина В. В. Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях. – Тольяттинский государственный университет, 2012. – С. 103.
- Вахнина В. В., Кувшинов А. А., Шаповалов В. А. и др. Механизмы воздействия квазипостоянных геоиндуцированных токов на электрические сети. – Москва : Инфра-Инженерия, 2018. – С. 256.
- Гусев Ю. П., Лхамдондог А., Монаков Ю. В. и др. Оценка воздействия геоиндуцированных токов на пусковые режимы силовых трансформаторов // Электрические станции. – 2020. – № 2. – С. 54–59.
- Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирования спутниковых радионавигационных систем. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. – С. 349.

- Захаров В. И., Чернышов А. А., Милох В. и др. Влияние ионосферы на параметры навигационных сигналов GPS во время геомагнитной суббури // Геомагнетизм и аэрономия. — 2020. — Т. 60, № 6. — С. 769–782. — DOI: [10.31857/S0016794020060152](https://doi.org/10.31857/S0016794020060152).
- Касинский В. В., Птицына Н. Г., Ляхов Н. Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики и телемеханики // Геомагнетизм и аэрономия. — 2007. — Т. 47, № 5. — С. 714–718.
- Козелов Б. В., Черноус С. А., Шагимурагов И. И. и др. Гелиогеофизические факторы, влияние которых могло обусловить ошибки в работе GPS в период военных учений НАТО «Trident Juncture» с 25/10/2018 по 7/11/2018 // Труды ХЛП ежегодного семинара «Физика авроральных явлений». Т. 42. — Апатиты : Кольский научный центр Российской академии наук, 2019. — С. 48–52. — DOI: [10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.48-52](https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.48-52).
- Козырева О. В., Пилипенко В. А., Добровольский М. Н. и др. База данных геомагнитных наблюдений в российской Арктике и ее использование для оценки воздействий космической погоды на технологические системы // Солнечно-земная физика. — 2022. — Т. 8, № 1. — С. 39–50. — DOI: [10.12737/szf-81202205](https://doi.org/10.12737/szf-81202205).
- Костроминов А. М., Ложкин Р. О. Влияние геоиндуцированных токов на дроссель-трансформаторы рельсовых цепей железнодорожной автоматики // Известия Петербургского университета путей и сообщений. — 2021. — Т. 18, № 2. — С. 222–228. — DOI: [10.20295/1815-588X-2021-2-222-228](https://doi.org/10.20295/1815-588X-2021-2-222-228).
- Пилипенко А. В. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. — 2021. — Т. 7, № 3. — С. 72–110. — DOI: [10.12737/szf-73202106](https://doi.org/10.12737/szf-73202106).
- Пилипенко В. А., Браво М., Романова Н. В. и др. Геомагнитный и ионосферный отклики на межпланетную ударную волну 17 марта 2015 г. // Физика Земли. — 2018. — № 5. — С. 61–80. — DOI: [10.1134/S0002333718050125](https://doi.org/10.1134/S0002333718050125).
- Птицына Н. Г., Виллорези Д., Дорман Л. И. и др. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы потенциально опасные для здоровья // Успехи физических наук. — 1998. — Т. 168, № 7. — С. 789–791.
- Птицына Н. Г., Тясто М. И., Касинский В. В. и др. Влияние космической погоды на технические системы: сбои железнодорожной аппаратуры во время геомагнитных бурь // Солнечно-земная физика. — 2008. — Т. 12–2 (125). — С. 360.
- Сахаров Я. А., Каткалов Ю. В., Селиванов В. Н. и др. Регистрация геоиндуцированных токов в региональной энергосистеме // Практические аспекты гелиогеофизики: тр. 11-й ежегод. конф. «Физика плазмы в солнечной системе». — Москва : Институт космических исследований Российской академии наук, 2016. — С. 134–145.
- Сахаров Я. А., Кудряшова Н. В., Данилин А. Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики // Вестник МИИТ. — 2009. — Т. 21. — С. 107–111.
- Трищенко Л. Д. Геомагнитные возмущения и системы электроснабжения и проводной связи // «Плазменная гелиофизика». Т. 2. — Москва : Физматлит, 2008. — С. 213–219.
- Тропичев О. А., Сормаков А. Д. Мониторинг космической погоды по данным наземных магнитных измерений // Метеорология и Гидрология. — 2021. — Т. 3. — С. 12–27. — DOI: [10.52002/0130-2906-2021-3-12-27](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-3-12-27).
- Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., et al. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips // Advances in Space Research. — 2009. — Vol. 43, no. 6. — P. 964–972. — DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.015).
- Alekseev D., Kuvshinov A., Palshin N. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications // Earth, Planets and Space. — 2015. — Т. 67, № 1. — С. 108. — DOI: [10.1186/s40623-015-0272-5](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5).
- Alm E. Measures against geomagnetic disturbances in the entire DC track circuit for automatic signaling systems // Infrastructure Resilience Risk Reporter. — 1956. — Vol. 1, no. 10. — P. 10–27. — (in Swedish).
- Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., et al. Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems // Space Weather. — 2014. — Vol. 12, no. 7. — P. 508–525. — DOI: [10.1002/2014SW001072](https://doi.org/10.1002/2014SW001072).
- Basu S., Basu S., Makela J. J., et al. Large magnetic storm-induced nighttime ionospheric flows at mid-latitudes and their impacts on GPS-based navigation systems // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — Vol. 113, A3. — A00A06. — DOI: [10.1029/2008JA013076](https://doi.org/10.1029/2008JA013076).
- Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., et al. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // Journal of Space Weather and Space Climate. — 2019. — Vol. 9. — A18. — DOI: [10.1051/swsc/2019015](https://doi.org/10.1051/swsc/2019015).
- Béland J., Small K. Space Weather Effects on Power Transmission Systems: The Cases of Hydro-

- Québec and Transpower New ZealandLtd // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure / ed. by I. A. *Daglis*. — Dordrecht : Springer Netherlands, 2005. — P. 287–299.
- Belov A. V., Gaidash S. P., Eroshenko E. A., *et al.* Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // 2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. — St. Petersburg, Russia : IEEE, 2007. — P. 280–282. — DOI: [10.1109/EMCECO.2007.4371710](https://doi.org/10.1109/EMCECO.2007.4371710).
- Boteler D. H. Modeling geomagnetic interference on railway signaling track circuits // Space Weather. — 2021. — Vol. 19, no. 1. — P. 18. — DOI: [10.1029/2020SW002609](https://doi.org/10.1029/2020SW002609).
- Chinkin V. E., Soloviev A. A., Pilipenko V. A., *et al.* Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2021. — Vol. 212. — P. 105514. — DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105514](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514).
- Cid C., Saiz E., Guerrero A., *et al.* A Carrington-like geomagnetic storm observed in the 21st century // Journal of Space Weather and Space Climate. — 2015. — Vol. 5. — A16. — DOI: [10.1051/swsc/2015017](https://doi.org/10.1051/swsc/2015017).
- Dimmock A. P., Rosenqvist L., Hall J.-O., *et al.* The GIC and geomagnetic response over Fennoscandia to the 7–8 September 2017 geomagnetic storm // Space Weather. — 2019. — Vol. 17. — P. 989–1010. — DOI: [10.1029/2018SW002132](https://doi.org/10.1029/2018SW002132).
- Eroshenko E. A., Belov A. V., Boteler D., *et al.* Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // Advances in Space Research. — 2010. — Vol. 46, no. 9. — P. 1102–1110. — DOI: [10.1016/j.asr.2010.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.017).
- Garmabaki A. H. S., Marklund S., Thaduri A., *et al.* Underground pipelines and railway infrastructure – failure consequences and restrictions // Structure and Infrastructure Engineering. — 2019. — Vol. 16, no. 3. — P. 412–430. — DOI: [10.1080/15732479.2019.1666885](https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1666885).
- Gaunt C. T. Why space weather is relevant to electrical power systems // Space Weather. — 2016. — Vol. 14, no. 1. — P. 2–9. — DOI: [10.1002/2015SW001306](https://doi.org/10.1002/2015SW001306).
- Goodman J. M. Space Weather & Telecommunications. — Springer New York, 2005. — P. 382. — DOI: [10.1007/b102193](https://doi.org/10.1007/b102193).
- Huang W., Aa E., Shen H., *et al.* Statistical study of GNSS L-band solar radio bursts // GPS Solutions. — 2018. — Vol. 22, no. 4. — P. 114. — DOI: [10.1007/s10291-018-0780-4](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0780-4).
- Kappenman J. G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // Space Weather. — 2005. — Vol. 3, no. 8. — S08C01. — DOI: [10.1029/2004SW000128](https://doi.org/10.1029/2004SW000128).
- Kintner P. M., Ledvina B. M., Paula E. R. de. GPS and ionospheric scintillations // Space Weather. — 2007. — Vol. 5, no. 9. — P. 23. — DOI: [10.1029/2006SW000260](https://doi.org/10.1029/2006SW000260).
- Knipp D. J., Fraser B. J., Shea M. A., *et al.* On the little-known consequences of the 4 August 1972 ultra-fast coronal mass ejecta: Facts, commentary, and call to action // Space Weather. — 2018. — Vol. 16, no. 11. — P. 1635–1643. — DOI: [10.1029/2018SW002024](https://doi.org/10.1029/2018SW002024).
- Kozyreva O., Pilipenko V., Krasnoperov R., *et al.* Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents // Annals of Geophysics. — 2019a. — Vol. 62. — P. 21. — DOI: [10.4401/ag-8198](https://doi.org/10.4401/ag-8198).
- Kozyreva O., Pilipenko V., Sokolova E., *et al.* Geomagnetic and telluric field variability as a driver of geomagnetically induced currents // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. — Springer International Publishing, 2019b. — P. 297–307. — DOI: [10.1007/978-3-030-21788-4_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_26).
- Krausmann E., Andersson E., Russell T., *et al.* Space weather and rail: findings and outlook. — Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2015. — P. 29. — DOI: [10.2788/211456](https://doi.org/10.2788/211456).
- Liu L., Ge X., Zong W., *et al.* Analysis of the monitoring data of geomagnetic storm interference in the electrification system of a high-speed railway // Space Weather. — 2016. — Vol. 14, no. 10. — P. 754–763. — DOI: [10.1002/2016SW001411](https://doi.org/10.1002/2016SW001411).
- Love J. J., Hayakawa H., Cliver E. W. Intensity and impact of the New York railroad superstorm of May 1921 // Space Weather. — 2019. — Vol. 17, no. 8. — P. 1281–1292. — DOI: [10.1029/2019SW002250](https://doi.org/10.1029/2019SW002250).
- Molinski T. S. Why utilities respect geomagnetically induced currents // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2002. — Vol. 64, no. 16. — P. 1765–1778. — DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00126-8).
- Newell P. T., Liou K., Zhang Y., *et al.* OVA-TION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // Space Weather. — 2014. — Vol. 12, no. 6. — P. 368–379. — DOI: [10.1002/2014sw001056](https://doi.org/10.1002/2014sw001056).
- Niska S., Schunnesson H., Kumar U. Measurements and analysis of electromagnetic interference in a railway signal box—a case study // International

- Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. — 2011. — Vol. 18, no. 03. — P. 285–303. — DOI: [10.1142/S0218539311004147](https://doi.org/10.1142/S0218539311004147).
- Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. — Springer Berlin, Heidelberg, 2013. — P. 528. — DOI: [10.1007/978-3-642-30281-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30281-7).
- Oughton E. J., Skelton A., Horne R. B., *et al.* Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure // Space Weather. — 2017. — Vol. 15, no. 1. — P. 65–83. — DOI: [10.1002/2016SW001491](https://doi.org/10.1002/2016SW001491).
- Patterson C. J., Wild J. A., Boteler D. H. Modeling the Impact of Geomagnetically Induced Currents on Electrified Railway Signaling Systems in the United Kingdom // Space Weather. — 2023. — Vol. 21, no. 3. — e2022SW003385. — DOI: [10.1029/2022SW003385](https://doi.org/10.1029/2022SW003385).
- Pirjola R. Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems // Surveys in Geophysics. — 2002. — Vol. 23. — P. 71–90. — DOI: [10.1023/A:1014816009303](https://doi.org/10.1023/A:1014816009303).
- Ptitsyna N. G., Kasinskii V. V., Villoresi G., *et al.* Geomagnetic effects on mid-latitude railways: A statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway // Advances in Space Research. — 2008. — Vol. 42, no. 9. — P. 1510–1514. — DOI: [10.1016/j.asr.2007.10.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.10.015).
- Ptitsyna N. G., Tyasto M. I., Kassinskii V. V., *et al.* Do natural magnetic fields disturb railway telemetry? // 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. — St. Petersburg, Russia : IEEE, 2007. — P. 288–290. — DOI: [10.1109/EMCECO.2007.4371713](https://doi.org/10.1109/EMCECO.2007.4371713).
- Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A., *et al.* Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness // Space Weather. — 2017. — Vol. 15, no. 7. — P. 828–856. — DOI: [10.1002/2016SW001501](https://doi.org/10.1002/2016SW001501).
- Qian X., Tian H., Yin Y. Geomagnetic storms' influence on intercity railway track circuit // Urban Rail Transit. — 2016. — Vol. 2, no. 2. — P. 85–91. — DOI: [10.1007/s40864-016-0040-2](https://doi.org/10.1007/s40864-016-0040-2).
- Sakharov Y. A., Kudryashova N. V., Danilin A. N., *et al.* Geomagnetic disturbances and railway automatic failures // 8th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. — St-Petersburg, Russia : IEEE, 2009. — P. 235–236.
- Sato H., Jakowski N., Berdermann J., *et al.* Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies // Space Weather. — 2019. — Vol. 17, no. 6. — P. 816–826. — DOI: [10.1029/2019SW002198](https://doi.org/10.1029/2019SW002198).
- Thaduri A., Galar D., Kumar U. Space weather climate impacts on railway infrastructure // International Journal of System Assurance Engineering and Management. — 2020. — Vol. 11, S2. — P. 267–281. — DOI: [10.1007/s13198-020-01003-9](https://doi.org/10.1007/s13198-020-01003-9).
- Tsubouchi K., Omura Y. Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events // Space Weather. — 2007. — Vol. 5, no. 12. — 1–12. — DOI: [10.1029/2007SW000329](https://doi.org/10.1029/2007SW000329).
- Viljanen A., Pulkkinen A., Pirjola R., *et al.* Recordings of geomagnetically induced currents and a nowcasting service of the Finnish natural gas pipeline system // Space Weather. — 2006. — Vol. 4, no. 10. — S10004. — DOI: [10.1029/2006SW000234](https://doi.org/10.1029/2006SW000234).
- Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Krasnoperov R. I., *et al.* Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the «virtual globe» technology // Russian Journal of Earth Sciences. — 2020. — Vol. 20, no. 6. — 1–9. — DOI: [10.2205/2020ES000721](https://doi.org/10.2205/2020ES000721).
- Warnant R., Lejeune S., Bavier M. Space weather influence on satellite-based navigation and precise positioning // Space Weather. Astrophysics and Space Science Library. Vol. 344 / ed. by J. Liliensten. — Dordrecht : Springer, 2007. — 129–146. — DOI: [10.1007/1-4020-5446-7_14](https://doi.org/10.1007/1-4020-5446-7_14).
- Wik M., Pirjola R., Lundstedt H., *et al.* Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems // Annales Geophysicae. — 2009. — Vol. 27, no. 4. — 1775–1787. — DOI: [10.5194/angeo-27-1775-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1775-2009).
- Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratovsky K. Small-scale ionospheric irregularities of auroral origin at mid-latitudes during the 22 June 2015 magnetic storm and their effect on GPS positioning // Remote Sensing. — 2020. — Vol. 12, no. 10. — P. 1579. — DOI: [10.3390/rs12101579](https://doi.org/10.3390/rs12101579).
- Yasyukevich Y. V., Yasyukevich A. S., Astafyeva E. I. How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts // GPS Solutions. — 2021. — Vol. 25, no. 2. — P. 12. — DOI: [10.1007/s10291-021-01091-5](https://doi.org/10.1007/s10291-021-01091-5).
- Zhang J. J., Wang C., Sun T. R., *et al.* GIC due to storm sudden commencement in low-latitude high-voltage power network in China: Observation and simulation // Space Weather. — 2015. — Vol. 13, no. 10. — P. 643–655. — DOI: [10.1002/2015sw001263](https://doi.org/10.1002/2015sw001263).



INFLUENCE OF SPACE WEATHER ON THE RELIABILITY OF THE TRANSPORT SYSTEM FUNCTIONING AT HIGH LATITUDES

V. A. Pilipenko^{1,2}, A. A. Chernikov³, A. A. Soloviev^{1,2}, N. V. Yagova^{1,2}, Ya. A. Sakharov^{1,4}, D. V. Kudin¹, D. V. Kostarev^{1,5}, O. V. Kozyreva^{1,2}, A. V. Vorobev^{1,6}, A. V. Belov⁷

¹Geophysical Center RAS, Moscow, Russia

²Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow

³Research Institute of Informatics and Communications in Railway Transport, Moscow

⁴Polar Geophysical Institute, Kola Branch of RAS, Apatity

⁵Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of RAS, Irkutsk

⁶Ufa University of Science and Technology, Ufa

⁷Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Troitsk

*Correspondence to: V. A. Pilipenko, pilipenko_va@mail.ru,

Received 31 October 2022; accepted 27 February 2023; published 24 June 2023

The review offered for the first time in the Russian scientific literature is devoted to various aspects of the problem of the impact of space weather on ground transport systems. An analysis of available information indicates that space weather disturbances can affect rail infrastructure through both direct and indirect effects on system components. One of the main hazards is geomagnetically induced currents (GICs) in grounded extended structures excited by the geomagnetic field disturbances. The telluric electric fields and currents associated with them can cause power outages and malfunctions in the railway automation track circuits. Indirect impact is possible through disturbances in the stable supply of electricity, disturbances in communication systems and in the appearance of positioning errors in global navigation satellite systems. The review provides information necessary for engineers of transport and energy systems about the main factors of space weather that could pose a threat to such systems. Examples of the influence of geomagnetic disturbances on the automatic signaling of the northern sections of Russian Railways are given. The prospects for monitoring space weather and the aurora oval for the needs of Russian Railways are discussed.

Keywords: space weather, railway automation, geinduced currents, global navigation satellite systems, radio communication, magnetic storms.

Citation: Pilipenko, V. A., A. A. Chernikov, A. A. Soloviev, N. V. Yagova, Ya. A. Sakharov, D. V. Kostarev, O. V. Kozyreva, A. V. Vorobev, and A. V. Belov (2023), Influence of Space Weather on the Reliability of the Transport System Functioning at High Latitudes, *Russian Journal of Earth Sciences*, v. 23, ES2008, 10.2205/2023ES000824

REFERENCES

- Afraimovich E. L., Gavriilyuk N. S., Demyanov V. V., *et al.* Failures in the functioning of GPS-GLONASS satellite navigation systems due to powerful radio emission from the sun during solar flares on December 6, 13, 2006 and October 28, 2003 // *Space research*. — 2009a. — Vol. 47, no. 2. — P. 146–157.
- Afraimovich E. L., Perevalova N. P. GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere. — Irkutsk : Publishing house of GU SC RVH VSNC SO RAMS, 2006. — P. 479.
- Afraimovich E., Astafyeva E., Demyanov V., *et al.* Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips // *Advances in Space Research*. — 2009b. — Vol. 43, no. 6. — P. 964–972. — DOI: [10.1016/j.asr.2008.09.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.015).

- Alekseev D., Kuvshinov A., Palshin N. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications // *Earth, Planets and Space*. — 2015. — Т. 67, № 1. — С. 108. — DOI: [10.1186/s40623-015-0272-5](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5).
- Alma E. Measures against geomagnetic disturbances in the entire DC track circuit for automatic signaling systems // *Infrastructure Resilience Risk Reporter*. — 1956. — Vol. 1, no. 10. — P. 10–27. — (in Swedish).
- Astafyeva E., Yasyukevich Y., Maksikov A., *et al.* Geomagnetic storms, super-storms, and their impacts on GPS-based navigation systems // *Space Weather*. — 2014. — Vol. 12, no. 7. — P. 508–525. — DOI: [10.1002/2014SW001072](https://doi.org/10.1002/2014SW001072).
- Basu S., Basu S., Makela J., *et al.* Large magnetic storm-induced nighttime ionospheric flows at midlatitudes and their impacts on GPS-based navigation systems // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2008. — Vol. 113, A3. — A00A06. — DOI: [10.1029/2008JA013076](https://doi.org/10.1029/2008JA013076).
- Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., *et al.* Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // *Journal of Space Weather and Space Climate*. — 2019. — Vol. 9. — A18. — DOI: [10.1051/swsc/2019015](https://doi.org/10.1051/swsc/2019015).
- Béland J., Small K. Space Weather Effects on Power Transmission Systems: The Cases of Hydro-Québec and Transpower New Zealand Ltd // *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure* / ed. by I. A. *Daglis*. — Dordrecht : Springer Netherlands, 2005. — P. 287–299.
- Belov A., Gaidash S., Eroshenko E., *et al.* Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // *2007 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology*. — St. Petersburg, Russia : IEEE, 2007. — P. 280–282. — DOI: [10.1109/EMCECO.2007.4371710](https://doi.org/10.1109/EMCECO.2007.4371710).
- Bernhardt O. I. Influence of space weather factors on the operation of radio facilities // *Solar-terrestrial physics*. — 2017. — Vol. 3, no. 3. — P. 40–60. — DOI: [10.12737/szf-33201705](https://doi.org/10.12737/szf-33201705).
- Blagoveshchensky D. V. Influence of geomagnetic storms/substorms on HF propagation (review) // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2013. — Vol. 53, no. 4. — P. 435–450. — DOI: [10.7868/S0016794013040032](https://doi.org/10.7868/S0016794013040032).
- Boteler D. Modeling geomagnetic interference on railway signaling track circuits // *Space Weather*. — 2021. — Vol. 19, no. 1. — P. 18. — DOI: [10.1029/2020SW002609](https://doi.org/10.1029/2020SW002609).
- Chinkin V., Soloviev A., Pilipenko V., *et al.* Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2021. — Vol. 212. — P. 105514. — DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105514](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514).
- Cid C., Saiz E., Guerrero A., *et al.* A Carrington-like geomagnetic storm observed in the 21st century // *Journal of Space Weather and Space Climate*. — 2015. — Vol. 5. — A16. — DOI: [10.1051/swsc/2015017](https://doi.org/10.1051/swsc/2015017).
- Demyanov V. V., Yasyukevich Y. V. Mechanisms of the impact of irregular geophysical factors on the functioning of satellite radio navigation systems. — Irkutsk : ISU Publishing House, 2014. — P. 349.
- Dimmock A., Rosenqvist L., Hall J., *et al.* The GIC and geomagnetic response over Fennoscandia to the 7–8 September 2017 geomagnetic storm // *Space Weather*. — 2019. — Vol. 17. — P. 989–1010. — DOI: [10.1029/2018SW002132](https://doi.org/10.1029/2018SW002132).
- Eroshenko E., Belov A., Boteler D., *et al.* Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // *Advances in Space Research*. — 2010. — Vol. 46, no. 9. — P. 1102–1110. — DOI: [10.1016/j.asr.2010.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.017).
- Garmabaki A., Marklund S., Thaduri A., *et al.* Underground pipelines and railway infrastructure – failure consequences and restrictions // *Structure and Infrastructure Engineering*. — 2019. — Vol. 16, no. 3. — P. 412–430. — DOI: [10.1080/15732479.2019.1666885](https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1666885).
- Gaunt C. Why space weather is relevant to electrical power systems // *Space Weather*. — 2016. — Vol. 14, no. 1. — P. 2–9. — DOI: [10.1002/2015SW001306](https://doi.org/10.1002/2015SW001306).
- Goodman J. *Space Weather & Telecommunications*. — Springer New York, 2005. — P. 382. — DOI: [10.1007/b102193](https://doi.org/10.1007/b102193).
- Gusev Y., Lkhamdong A., Monakov Y., *et al.* Evaluating the Effect of Geinduced Currents on the Startup Modes of Power Transformers // *Power Technology and Engineering*. — 2020. — Vol. 54, no. 2. — P. 285–290. — DOI: [10.1007/s10749-020-01202-1](https://doi.org/10.1007/s10749-020-01202-1).
- Huang w., Aa E., Shen H., *et al.* Statistical study of GNSS L-band solar radio bursts // *GPS Solutions*. — 2018. — Vol. 22, no. 4. — P. 114. — DOI: [10.1007/s10291-018-0780-4](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0780-4).
- Kappenman J. G. An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts associated with the violent Sun-Earth connection events of 29–31 October 2003 and a comparative evaluation with other contemporary storms // *Space Weather*. — 2005. — Vol. 3,

- no. 8. — S08C01. — DOI: [10.1029/2004SW000128](https://doi.org/10.1029/2004SW000128).
- Kasinsky V. V., Ptitsyna N. G., Lyakhov N. N., *et al.* Influence of geomagnetic disturbances on the operation of railway automation and telemechanics // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2007. — Vol. 47, no. 5. — P. 714–718.
- Kintner P., Ledvina B., Paula E. de. GPS and ionospheric scintillations // *Space Weather*. — 2007. — Vol. 5, no. 9. — P. 23. — DOI: [10.1029/2006SW000260](https://doi.org/10.1029/2006SW000260).
- Knipp D., Fraser B., Shea M., *et al.* On the little-known consequences of the 4 August 1972 ultra-fast coronal mass ejecta: Facts, commentary, and call to action // *Space Weather*. — 2018. — Vol. 16, no. 11. — P. 1635–1643. — DOI: [10.1029/2018SW002024](https://doi.org/10.1029/2018SW002024).
- Kostrominov A. M., Lozhkin R. O. Influence of geinduced currents on choke-transformers of rail circuits of railway automation // *News of St. Petersburg University of Railways and Communications*. — 2021. — Vol. 18, no. 2. — P. 222–228. — DOI: [10.20295/1815-588X-2021-2-222-228](https://doi.org/10.20295/1815-588X-2021-2-222-228).
- Kozelov B. V., Chernous S. A., Shagimuratov I. I., *et al.* Solar geophysical factors that could have caused errors in GPS operation during the NATO military exercise "Trident Juncture" from 25/10/2018 to 7/11/2018 // *Proceedings of the XLII Annual Seminar «Physics of Auroral Phenomena»*. Vol. 42. — Apatity : Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 2019. — P. 48–52. — DOI: [10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.48-52](https://doi.org/10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.48-52).
- Kozyreva O., Pilipenko V., Krasnoperov R., *et al.* Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents // *Annals of Geophysics*. — 2019a. — Vol. 62. — P. 21. — DOI: [10.4401/ag-8198](https://doi.org/10.4401/ag-8198).
- Kozyreva O., Pilipenko V., Sokolova E., *et al.* Geomagnetic and telluric field variability as a driver of geomagnetically induced currents // *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. — Springer International Publishing, 2019b. — P. 297–307. — DOI: [10.1007/978-3-030-21788-4_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_26).
- Kozyreva O. V., Pilipenko V. A., Dobrovolsky M. N., *et al.* Database of geomagnetic observations in the Russian Arctic and its use to assess the impact of space weather on technological systems // *Solar-terrestrial physics*. — 2022. — Vol. 8, no. 1. — P. 39–50. — DOI: [10.12737/szf-81202205](https://doi.org/10.12737/szf-81202205).
- Krausmann E., Andersson E., Russell T., *et al.* Space weather and rail: findings and outlook. — Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2015. — P. 29. — DOI: [10.2788/211456](https://doi.org/10.2788/211456).
- Liu L., Ge X., Zong W., *et al.* Analysis of the monitoring data of geomagnetic storm interference in the electrification system of a high-speed railway // *Space Weather*. — 2016. — Vol. 14, no. 10. — P. 754–763. — DOI: [10.1002/2016SW001411](https://doi.org/10.1002/2016SW001411).
- Love J., Hayakawa H., Cliver E. Intensity and impact of the New York railroad superstorm of May 1921 // *Space Weather*. — 2019. — Vol. 17, no. 8. — P. 1281–1292. — DOI: [10.1029/2019SW002250](https://doi.org/10.1029/2019SW002250).
- Molinski T. Why utilities respect geomagnetically induced currents // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2002. — Vol. 64, no. 16. — P. 1765–1778. — DOI: [10.1016/S1364-6826\(02\)00126-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00126-8).
- Newell P., Liou K., Zhang Y., *et al.* OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels // *Space Weather*. — 2014. — Vol. 12, no. 6. — P. 368–379. — DOI: [10.1002/2014sw001056](https://doi.org/10.1002/2014sw001056).
- Niska S., Schunnesson H., Kumar U. Measurements and analysis of electromagnetic interference in a railway signal box—a case study // *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*. — 2011. — Vol. 18, no. 03. — P. 285–303. — DOI: [10.1142/S0218539311004147](https://doi.org/10.1142/S0218539311004147).
- Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways*. — Springer Berlin, Heidelberg, 2013. — P. 528. — DOI: [10.1007/978-3-642-30281-7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-30281-7).
- Oughton E., Skelton A., Horne R., *et al.* Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure // *Space Weather*. — 2017. — Vol. 15, no. 1. — P. 65–83. — DOI: [10.1002/2016SW001491](https://doi.org/10.1002/2016SW001491).
- Patterson C., Wild J., Boteler D. Modeling the Impact of Geomagnetically Induced Currents on Electrified Railway Signaling Systems in the United Kingdom // *Space Weather*. — 2023. — Vol. 21, no. 3. — e2022SW003385. — DOI: [10.1029/2022SW003385](https://doi.org/10.1029/2022SW003385).
- Pilipenko A. V. The impact of space weather on terrestrial technological systems // *Solar-terrestrial physics*. — 2021. — Vol. 7, no. 3. — P. 72–110. — DOI: [10.12737/szf-73202106](https://doi.org/10.12737/szf-73202106).
- Pilipenko V. A., Bravo M., Romanova N. V., *et al.* Geomagnetic and ionospheric responses to the

- interplanetary shock on March 17, 2015 // *Physics of the Earth*. — 2018. — No. 5. — P. 61–80. — DOI: [10.1134/S0002333718050125](https://doi.org/10.1134/S0002333718050125).
- Pirjola R. Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems // *Surveys in Geophysics*. — 2002. — Vol. 23. — P. 71–90. — DOI: [10.1023/A:1014816009303](https://doi.org/10.1023/A:1014816009303).
- Ptitsyna N. G., Tyasto M. I., Kasinsky V. V., *et al.* Influence of space weather on technical systems: failures of railway equipment during geomagnetic storms // *Solar-terrestrial physics*. — 2008a. — Vol. 12-2 (12-5). — 360.
- Ptitsyna N. G., Villoresi D., Dorman L. I., *et al.* Natural and technogenic low-frequency magnetic fields as factors potentially hazardous to health // *Progress in physical sciences*. — 1998. — Vol. 168, no. 7. — P. 789–791.
- Ptitsyna N., Kasinskii V., Villoresi G., *et al.* Geomagnetic effects on mid-latitude railways: A statistical study of anomalies in the operation of signaling and train control equipment on the East-Siberian Railway // *Advances in Space Research*. — 2008b. — Vol. 42, no. 9. — P. 1510–1514. — DOI: [10.1016/j.asr.2007.10.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.10.015).
- Ptitsyna N., Tyasto M., Kassinskii V., *et al.* Do natural magnetic fields disturb railway telemetry? // 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. — St. Petersburg, Russia : IEEE, 2007. — 288–290. — DOI: [10.1109/EMCECO.2007.4371713](https://doi.org/10.1109/EMCECO.2007.4371713).
- Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A., *et al.* Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness // *Space Weather*. — 2017. — Vol. 15, no. 7. — P. 828–856. — DOI: [10.1002/2016SW001501](https://doi.org/10.1002/2016SW001501).
- Qian X., Tian H., Yin Y. Geomagnetic storms' influence on intercity railway track circuit // *Urban Rail Transit*. — 2016. — Vol. 2, no. 2. — P. 85–91. — DOI: [10.1007/s40864-016-0040-2](https://doi.org/10.1007/s40864-016-0040-2).
- Sakharov I. A., Katkalov Y. V., Selivanov V. N., *et al.* Registration of geinduced currents in the regional power system // *Practical aspects of heliogeophysics: tr. 11th year. conf. «Plasma physics in the solar system»*. — Moscow : Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 2016. — P. 134–145.
- Sakharov I. A., Kudryashova N. V., Danilin A. N., *et al.* The impact of geomagnetic disturbances on the operation of railway automation // *Bulletin of MIIT*. — 2009a. — Vol. 21. — P. 107–111.
- Sakharov Y. A., Kudryashova N., Danilin A., *et al.* Geomagnetic disturbances and railway automatic failures // 8th International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology. — St-Petersburg, Russia : IEEE, 2009b. — P. 235–236.
- Sato H., Jakowski N., Berdermann J., *et al.* Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies // *Space Weather*. — 2019. — Vol. 17, no. 6. — P. 816–826. — DOI: [10.1029/2019SW002198](https://doi.org/10.1029/2019SW002198).
- Thaduri A., Galar D., Kumar U. Space weather climate impacts on railway infrastructure // *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. — 2020. — Vol. 11, S2. — P. 267–281. — DOI: [10.1007/s13198-020-01003-9](https://doi.org/10.1007/s13198-020-01003-9).
- Trishchenko L. D. Geomagnetic disturbances and power supply and wire communication systems // «Plasma heliophysics». Vol. 2. — Moscow : Fizmatlit, 2008. — P. 213–219.
- Troshichev O. A., Sormakov A. D. Space weather monitoring based on ground-based magnetic measurements // *Meteorology and Hydrology*. — 2021. — Vol. 3. — P. 12–27. — DOI: [10.52002/0130-2906-2021-3-12-27](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-3-12-27).
- Tsubouchi K., Omura Y. Long-term occurrence probabilities of intense geomagnetic storm events // *Space Weather*. — 2007. — Vol. 5, no. 12. — P. 1–12. — DOI: [10.1029/2007SW000329](https://doi.org/10.1029/2007SW000329).
- Vakhnina V. V. Modeling of operation modes of power transformers of power supply systems during geomagnetic storms. — Togliatti State University, 2012. — P. 103.
- Vakhnina V. V., Kuvshinov A. A., Shapovalov V. A., *et al.* Mechanisms of the impact of quasi-permanent geinduced currents on electrical networks. — Moscow : Infra-Engineering, 2018. — P. 256.
- Viljanen A., Pulkkinen A., Pirjola R., *et al.* Recordings of geomagnetically induced currents and a nowcasting service of the Finnish natural gas pipeline system // *Space Weather*. — 2006. — Vol. 4, no. 10. — S10004. — DOI: [10.1029/2006SW000234](https://doi.org/10.1029/2006SW000234).
- Vorobev A., Pilipenko V., Krasnoperov R., *et al.* Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the «virtual globe» technology // *Russian Journal of Earth Sciences*. — 2020. — Vol. 20, no. 6. — P. 1–9. — DOI: [10.2205/2020ES000721](https://doi.org/10.2205/2020ES000721).
- Warnant R., Lejeune S., Bavier M. Space weather influence on satellite-based navigation and

- precise positioning // *Space Weather. Astrophysics and Space Science Library*. Vol. 344 / ed. by J. *Lilensten*. — Dordrecht : Springer, 2007. — P. 129–146. — DOI: [10.1007/1-4020-5446-7_14](https://doi.org/10.1007/1-4020-5446-7_14).
- Wik M., Pirjola R., Lundstedt H., *et al.* Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems // *Annales Geophysicae*. — 2009. — Vol. 27, no. 4. — P. 1775–1787. — DOI: [10.5194/angeo-27-1775-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1775-2009).
- Yasyukevich Y., Vasilyev R., Ratovsky K. Small-scale ionospheric irregularities of auroral origin at mid-latitudes during the 22 June 2015 magnetic storm and their effect on GPS positioning // *Remote Sensing*. — 2020. — Vol. 12, no. 10. — P. 1579. — DOI: [10.3390/rs12101579](https://doi.org/10.3390/rs12101579).
- Yasyukevich Y. V., Yasyukevich A., Astafyeva E. How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts // *GPS Solutions*. — 2021. — Vol. 25, no. 2. — P. 12. — DOI: [10.1007/s10291-021-01091-5](https://doi.org/10.1007/s10291-021-01091-5).
- Zakharov V. I., Chernyshov A. A., Milokh V., *et al.* Influence of the ionosphere on the parameters of GPS navigation signals during a geomagnetic substorm // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2020. — Vol. 60, no. 6. — P. 769–782. — DOI: [10.31857/S0016794020060152](https://doi.org/10.31857/S0016794020060152).
- Zhang J., Wang C., Sun T., *et al.* GIC due to storm sudden commencement in low-latitude high-voltage power network in China: Observation and simulation // *Space Weather*. — 2015. — Vol. 13, no. 10. — P. 643–655. — DOI: [10.1002/2015sw001263](https://doi.org/10.1002/2015sw001263).