

**ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ  
И СБОЕВ В РАБОТЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ  
НА СЕВЕРЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

**SPATIAL DISTRIBUTION OF AURORAL PRECIPITATION  
AND FAILURES IN RAILWAY AUTOMATICS  
AT THE NORTH OF EUROPEAN RUSSIA**

**Я.А. Сахаров**

*Полярный геофизический институт,  
Апатиты, Россия, sakharov@pgia.ru  
Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия*

**Н.В. Ягова** 

*Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия, nyagova@ifz.ru  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия*

**В.А. Пилипенко** 

*Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия, pilipenko\_va@mail.ru  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия*

**О.И. Ягодкина**

*Полярный геофизический институт,  
Апатиты, Россия, yagodkina@pgia.ru*

**С.Л. Гаранин**

*Институт геохимии и аналитической химии  
им. В.И. Вернадского РАН,  
Москва, Россия, lvovi4s@icloud.com*

**Ya.A. Sakharov**

*Polar Geophysical Institute,  
Apatity, Russia, sakharov@pgia.ru  
Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia*

**N.V. Yagova**

*Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia, nyagova@ifz.ru  
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia*

**V.A. Pilipenko**

*Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia, pilipenko\_va@mail.ru  
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia*

**O.I. Yagodkina**

*Polar Geophysical Institute,  
Apatity, Russia, yagodkina@pgia.ru*

**S.L. Garanin**

*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry  
of RAS,  
Moscow, Russia, lvovi4s@icloud.com*

**Аннотация.** Исследована связь между возмущениями космической погоды и пространственным распределением сбоев в работе железнодорожной автоматики на участках Северной и Октябрьской железных дорог в 2001–2006 гг. Во время наиболее сильных магнитных бурь, вызвавших многочисленные сбои, рассматриваются широтное распределение потока энергии авроральных электронов и локальная геомагнитная возмущенность, определенная как среднее значение модуля производной по времени горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $|dB_H/dt|$ . Показано, что на главной и восстановительной фазах магнитных бурь участки, на которых наблюдались сбои, попадали в область интенсивных авроральных высыпаний, а значение  $|dB_H/dt|$  превышало 5 нТл/с. Связь между положением экваториальной границы аврорального овала и пространственным распределением сбоев рассматривается как во время отдельных магнитных бурь, так и статистически за пять лет наблюдений. И отдельные события, и статистические тесты показывают, что смещение к югу экваториальной границы аврорального овала коррелирует с ростом доли сбоев на более низкоширотных участках железных дорог, соответствующих субавроральным геомагнитным широтам.

**Ключевые слова:** космическая погода, магнитные бури, авроральный овал, железные дороги.

**Abstract.** We study the relationship between space weather disturbances and spatial distribution of failures in railway automatics at segments of Northern and October railways in 2001–2006. During the most intensive magnetic storms that caused numerous failures, latitude distribution of auroral electron precipitation and local geomagnetic disturbance, determined as mean absolute value of time derivative of the geomagnetic field horizontal component  $|dB_H/dt|$ , are examined. We show that in magnetic storm main and recovery phases the segments, where the failures were recorded, correspond to the region of intense auroral precipitation and  $|dB_H/dt|$  exceeded 5 nT/s. The relationship between position of auroral oval equatorial boundary and spatial distribution of failures is analyzed for individual magnetic storms and statistically for five years of observations. Both individual cases and statistic tests show that southward displacement of the auroral oval equatorial boundary correlates with increase in the proportion of failures at lower latitude railway segments.

**Keywords:** space weather, magnetic storms, auroral oval, railways.

## ВВЕДЕНИЕ

В наиболее полном обзоре, посвященном воздействию космической погоды на функционирование железнодорожного транспорта [Пилипенко и др., 2023], приводится подробное описание прямых и косвенных механизмов влияния разных типов возмущений на работу систем железнодорожной автоматики, связи и навигации. Хотя самые ранние аварийные ситуации на железных дорогах, связанные с магнитными бурями, были зафиксированы больше века назад [Love et al., 2019], проблема остается актуальной до настоящего времени.

Воздействие возмущений космической погоды на связь и навигацию существенно зависит от лежащих в их основе физических механизмов, а для волновых электромагнитных устройств — от частоты. Таким образом, влияние космической погоды на эти устройства меняется при изменении технологий. Вместе с тем, существуют и принципиально неустранимые эффекты возмущений космической погоды. Они связаны с геоиндуцированными токами (ГИТ), которые возбуждаются в наземных проводниках вариациями геомагнитного поля.

При одинаковых параметрах внешних возмущений величина ГИТ тем больше, чем больше эффективная площадь контура, в котором наводится ЭДС индукции (токи в земной коре являются распределенными, поэтому о контуре можно говорить только условно). Высота контура определяется характерной частотой процесса и проводимостью земной коры, т. е. задается природными параметрами, а длина — длиной наземного проводника. В результате наиболее интенсивные ГИТ возникают в протяженных наземных проводниках, таких как ЛЭП, трубопроводы и рельсы.

ГИТ представляет собой дополнительный квазипостоянный ток, который, складываясь с сигнальным током рельсовой цепи, может вызвать некорректную работу автоматики, отвечающей за сигнал о занятости перегона. В работе [Boteler, 2021] на основе моделирования влияния ГИТ на работу железнодорожной автоматики делается вывод, что асимметрия цепи усиливает влияние ГИТ на электрифицированных железных дорогах с одним электрически непрерывным рельсом. Оценки, выполненные для железных дорог Великобритании, показывают, что максимальные риски нарушений в работе железнодорожной автоматики связаны с экстремальными магнитными бурями [Patterson et al., 2023a], причем пороговая величина электротеллурического поля ниже для наиболее опасного типа сбоя, когда разрешающий сигнал возникает при занятом перегоне [Patterson et al., 2023b].

Исследование сбоев в функционировании систем автоматики на Северной железной дороге во время наиболее сильных магнитных бурь (супербурь) показало [Eroshenko et al., 2010], что каждая буря является источником многочисленных сбоев на субавроральных широтах. Исследование сбоев в работе железнодорожной автоматики на Восточно-Сибирской

железнодорожной дороге выявило, что и на средних геомагнитных широтах вероятность сбоякратно возрастает при сильных геомагнитных возмущениях [Касинский и др., 2007; Ptitsyna et al., 2008]. Активное промышленное развитие Российской Арктики увеличивает риски, связанные с редкими событиями, и ставит вопрос о надежности функционирования транспортной инфраструктуры в условиях таких возмущений.

ГИТ наибольшей амплитудой возникают в зоне овала полярных сияний (аврорального овала) [Beggan, 2015]. При умеренных возмущениях экваториальная граница овала лежит на геомагнитных широтах выше  $65^\circ$  (авроральные широты), а при сильных возмущениях смещается на более низкие широты. В европейской части Российской Федерации достаточно протяженные участки Октябрьской и Северной железных дорог располагаются на авроральных широтах. Для этих участков опасность, связанная с ГИТ, возникает уже при умеренных возмущениях. На более низкоширотных участках этих железных дорог и на всех высокоширотных ветках в восточных регионах опасность представляют сильные геомагнитные возмущения, когда интенсивные ГИТ регистрируются на субавроральных (около  $60^\circ$ ) и средних геомагнитных широтах.

Интенсивность ГИТ зависит не только от аврорального электроджета, но и от геомагнитных пульсаций и вихревых структур [Viljanen et al., 2006; Wik et al., 2008; Wintoft et al., 2016; Сахаров и др., 2021]. При этом локализация наиболее интенсивных ГИТ в значительной мере определяется положением аврорального овала, что ставит вопрос о количественном описании связи между пространственным распределением сбоев и положением аврорального овала.

Первые решения задачи об определении положения аврорального овала по индексам геомагнитной активности и параметрам плазмы солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) были получены в 60–70 гг. прошлого века [Фельдштейн, 1963]. Детальное исследование пространственного распределения высыпаний авроральных электронов было проведено в серии работ, выполненных в Полярном геофизическом институте [Воробьев и др., 2000, Воробьев, Ягодкина, 2005]. Итогом этих исследований стало создание эмпирической модели высыпаний [Vorobjev et al., 2013].

Анализ данных ионосферных спутников позволил создать широко используемые модели границ высыпаний [Newell et al., 2002]. Уточнение существующих и создание новых моделей авроральных высыпаний продолжается, и появляются новые работы [Milan, 2009; Hu et al., 2017; Chisham et al., 2022]. Поскольку положение овала и интенсивность высыпаний важны для приложений, публикуются работы, посвященные прогнозу параметров высыпаний [Ohma et al., 2024], в том числе с использованием методов машинного обучения [Hu et al., 2021].

Тем не менее для многих задач положение экваториальной границы овала с достаточной точностью описывается простыми соотношениями, получен-

ными в пионерских работах. В первом приближении экваториальная граница овала может быть представлена в виде окружности с центром, смещенным к полуночи от геомагнитного полюса, и радиусом, определяемым параметром Акасофу [Akasofu, 1979] и интенсивностью кольцевого тока [Milan, 2009].

Статистические исследования в области влияния космической погоды на железнодорожную инфраструктуру ограничены низкой доступностью данных по сбоям. Современные данные почти не доступны для открытых исследований, а более ранние не унифицированы и не всегда оцифрованы. В результате большая часть работ по сбоям в работе железнодорожной автоматики основана на моделировании, тогда как анализу данных посвящено небольшое количество публикаций [Касинский и др., 2007; Ptitsyna et al., 2008; Wik et al., 2009; Eroshenko et al., 2010].

Настоящее исследование продолжает работу [Ягова и др., 2023], посвященную взаимосвязи частоты сбоев на участке Октябрьской железной дороги, лежащем на авроральных широтах (далее — авроральном участке), и геомагнитной активности на разных пространственных и временных масштабах. В настоящей работе рассматривается связь между положением аврорального овала и пространственным распределением сбоев как для отдельных сильных возмущений, так и в статистике.

## 1. ДАННЫЕ И ОБРАБОТКА

Рассматривается период с 2001 по 2006 г., приходящийся на фазы максимума и спада 23-го цикла солнечной активности. Для анализа используется участок Летнеозерский—Шестиозерский Северной железной дороги и два участка Октябрьской железной дороги: Мурманск—Кандалакша и Беломорск—Медвежья гора (рис. 1).

Для анализа отдельных событий были выбраны сильные магнитные бури, во время которых на Северной железной дороге регистрировались не имеющие явных внешних причин сбои, описанные в работе [Eroshenko et al., 2010]. Каждая из бурь вызывала сбой на географических широтах ниже  $64^\circ$ , что соответствует геомагнитным широтам  $\Phi < 60^\circ$ , т. е. субавроральной зоне. В настоящей работе рассматривается пространственное распределение авроральных высыпаний во время этих бурь. Для характеристики высыпаний используется плотность потока энергии авроральных электронов  $J_E$ , определенная по модели [Vorobjev et al., 2013] для соответствующего долготного сектора. Оценка локальной возмущенности геомагнитного поля проводится по данным магнитной станции Карпогоры (KPG). В таблице приведены наименования и коды пунктов, показанных на рис. 1, и магнитометрической станции KPG, их географические и исправленные геомагнитные (Corrected GeoMagnetic, CGM) координаты и мировое время (UT) местной магнитной полуночи.

Для каждой бури рассматриваются параметры межпланетной среды, наиболее сильно влияющие на геомагнитную активность: компоненты  $B_z$  и  $B_y$  ММП, скорость и динамическое давление СВ. Для оценки глобальной и локальной геомагнитной возмущенности используются соответственно индекс интен-

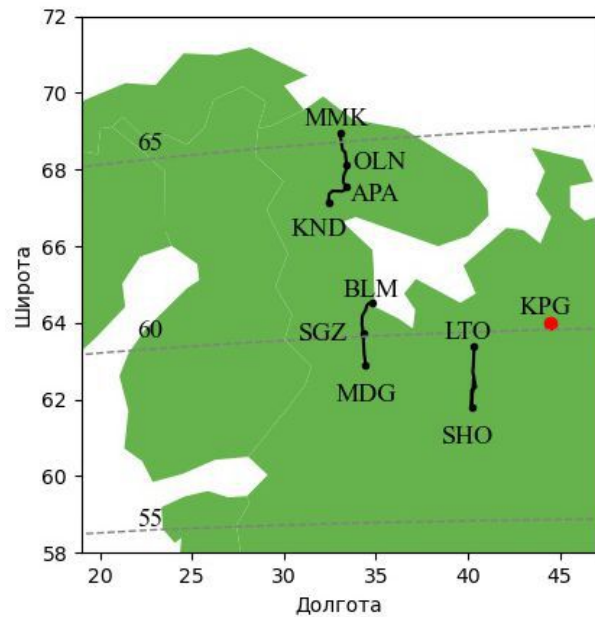


Рис. 1. Схема расположения магнитной станции Карпогоры и участков Октябрьской (MMK—KND и BLM—MDG) и Северной (LTO—SHO) железных дорог. Штрихами показаны геомагнитные параллели

сивности магнитной бури  $Dst$  и вариации геомагнитного поля на ст. KPG, а для описания авроральных высыпаний — широтное распределение потока энергии авроральных электронов  $J_E$ . Для статистического анализа используются данные по сбоям на двух участках Октябрьской железной дороги как во время магнитных бурь, так и в отсутствие бури. Статистически проверяется гипотеза о наличии связи между положением экваториальной границы аврорального овала и относительной частотой появления сбоев на авроральном и субавроральном участках.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

### 2.1. Анализ отдельных событий

Магнитная буря 11 апреля 2001 г. началась с возрастания скорости СВ  $V$  на  $\sim 100$  км/с в течение двух часов. На рис. 2, а видно, что до 13 UT  $V < 500$  км/с, а после 15 UT  $V > 600$  км/с. При таком режиме ускоренный поток СВ догоняет более медленный, плазма уплотняется и формируется скачок динамического давления СВ  $P_{SW}$ , что приводит к резкому приближению магнитопаузы к Земле. На рис. 2, б видны две ступеньки  $P_{SW}$ : с 1 до 5 нПа в 13:30 UT и до 20 нПа в 16 UT. Одновременно с последним скачком  $P_{SW}$  возникают резкие вариации ММП, причем компонента  $B_z < -30$  нТл (рис. 2, в).

В результате развивается магнитная буря с минимальным  $Dst = -270$  нТл (рис. 2, з), существенно возрастает поток авроральных электронов, а экваториальная граница аврорального овала смещается к более низким широтам. Максимальное смещение наблюдается в окологлобальном секторе (на долготе Северной железной дороги это 20–21 UT). В этом долготном секторе область интенсивных высыпаний электронов с энергиями 30 эВ – 30 кэВ распространяется на широты от  $70^\circ$  до  $52^\circ$ , что приводит к попа-



Положение магнитной станции Карпогоры и остановочных пунктов Северной и Октябрьской ж.д.

Название станции	Код	Назначение	Географические координаты		Геомагнитные (CGM) координаты		Мировое время местной магнитной полуночи
			широта	долгота	широта, $\Phi$	долгота, $\Lambda$	
Карпогоры	KPG	Магнитная станция ИЗМИРАН	64.0	44.5	60.0	120.8	20:33
Летнеозерский	LTO	Северная ж.д.	63.4	40.3	59.5	116.9	20:26
Шестиозерский	SHO	Северная ж.д.	61.8	40.2	57.9	116.3	20:30
Мурманск	MMK	Октябрьская ж.д.	69.0	33.1	65.3	113.8	20:38
Оленегорск	OLN	Октябрьская ж.д.	68.1	33.3	64.4	113.4	20:40
Апатиты	APA	Октябрьская ж.д.	67.6	33.4	63.8	113.1	20:41
Кандалакша	KND	Октябрьская ж.д.	67.2	32.4	63.5	112.1	20:45
Беломорск	BLM	Октябрьская ж.д.	64.5	34.8	60.8	112.6	20:43
Сегежа	SGZ	Октябрьская ж.д.	63.7	34.3	60.0	111.8	20:46
Медвежья гора	MDG	Октябрьская ж.д.	62.9	34.4	59.2	111.6	20:47

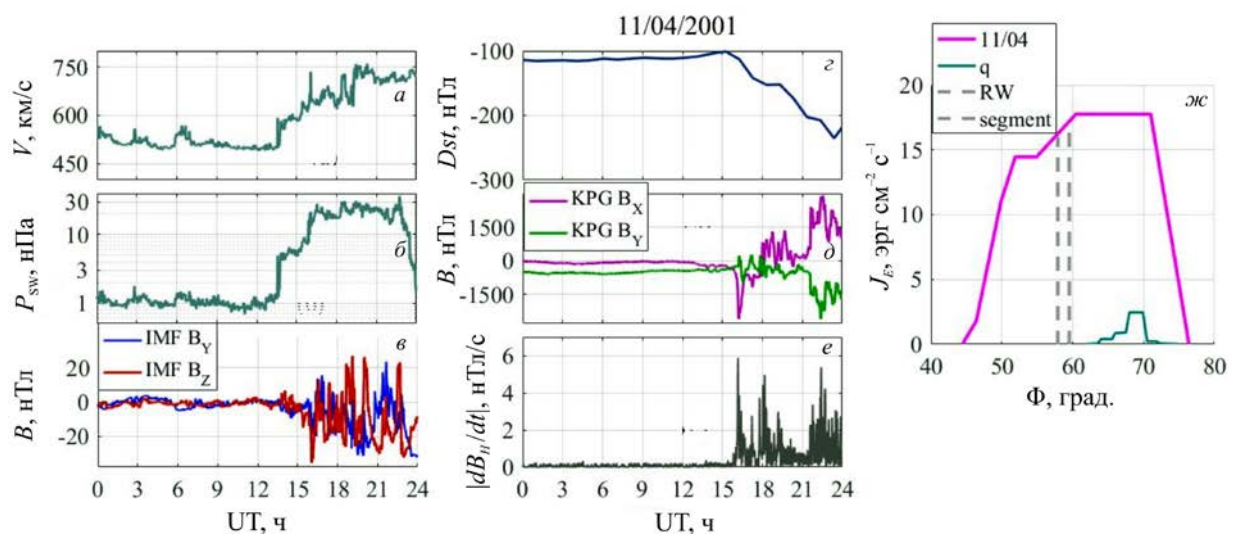


Рис. 2. Параметры межпланетной среды, геомагнитные возмущения и авроральные высыпания 11.04.2001: скорость  $V$  (а) и динамическое давление  $P_{sw}$  (б) СВ, компоненты  $B_y$ ,  $B_z$  ММП (в), индекс  $Dst$  (г), вариации горизонтальных компонент  $B_x$ ,  $B_y$  геомагнитного поля на ст. Карпогоры (д) и модуль производной по времени горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $|dB_H/dt|$  (е), а также распределения потока энергии высыпающихся авроральных электронов  $J_E$  по геомагнитной широте  $\Phi$  в 20:30 UT 11.04.2001 и в ближайший спокойный день (q) согласно [Vorobjev et al., 2013] (ж); вертикальные штрихи отмечают широтные границы участка Северной железной дороги

данию в зону интенсивных высыпаний участка Северной железной дороги SHO–LTO (рис. 2, ж).

Интенсивные возмущения на ст. Карпогоры начинаются около 16 UT с отрицательной бухты амплитудой около 2000 нТл в меридиональной  $B_z$ -компоненте геомагнитного поля и иррегулярных пульсаций размахом несколько сотен нанотесла в обеих горизонтальных компонентах (рис. 2, д). Модуль производной по времени горизонтальной компоненты магнитного поля  $|dB_H/dt|$  превышает 5 нТл/с (рис. 2, е), что существенно выше порога потенциально опасных возмущений [Viljanen et al., 2001].

Буря 7–9 ноября 2004 г. относится к так называемым супербурям. Повышенная геомагнитная активность длительно регистрируется на всех широтах [Manninen et al., 2008], а самые интенсивные возмущения возникают в зонах авроральных высыпаний. На рис. 3 показаны те же, что и на рис. 2, параметры межпланетной среды в период с 6 UT 7 ноября до конца дня 9 ноября. Буря начинается с резкого воз-

растания скорости и динамического давления СВ около 18 UT (рис. 3, а, б). Одновременно развиваются интенсивные вариации ММП (рис. 3, в), причем минимальное значение  $B_z$  достигает  $-50$  нТл. Начальная фаза бури характеризуется резким положительным всплеском  $Dst$  до  $+50$  нТл и последующим спадом до минимального значения  $Dst = -374$  нТл в 7 UT 8 ноября (рис. 3, г). После этого начинается фаза восстановления, которая около 10 UT 9 ноября прерывается новой «ступенькой» в давлении и скорости солнечного ветра, и в результате индекс  $Dst$ , восстановившийся к этому моменту до  $-120$  нТл, снова падает ниже  $-200$  нТл, а второй минимум  $Dst = -263$  нТл наблюдается 10 ноября. Следует отметить, что оба главных минимума  $Dst$  вызваны несколькими возмущениями солнечного ветра (рис. 3, а–в), что приводит к дополнительным ступенькам в вариациях  $Dst$  (рис. 3, г) и множественным авроральным активизациям (рис. 3, д) с 18 UT 7 ноября до 6 UT 8 ноября и в конце дня 9 ноября.

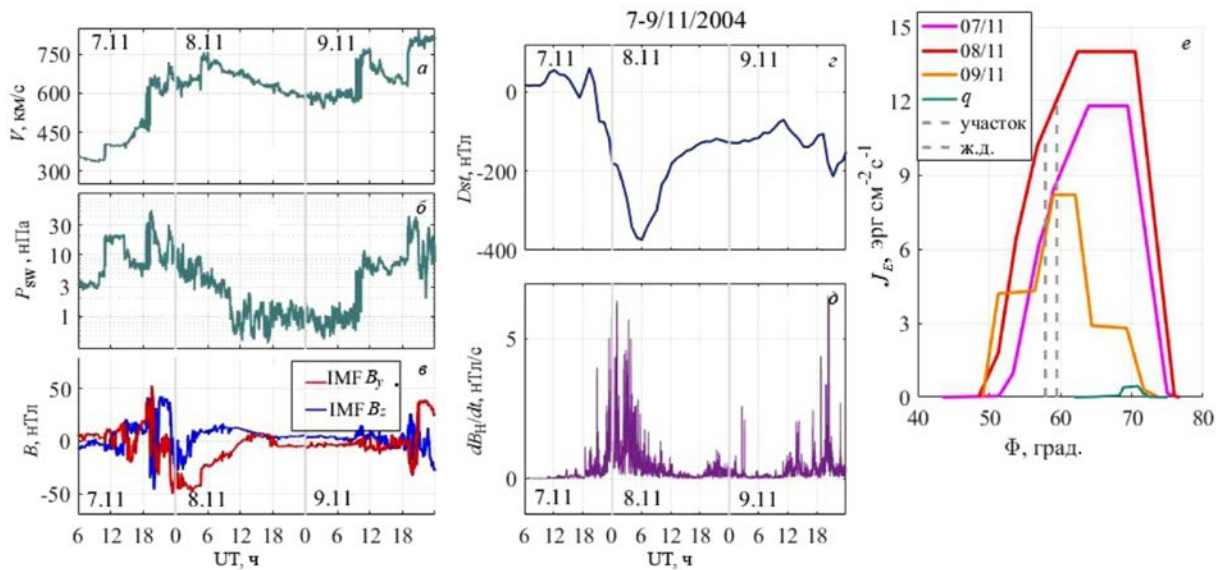


Рис. 3. Параметры межпланетной среды, геомагнитные возмущения и авроральные высыпания 7–9 ноября 2004 г.: скорость  $V$  (а) и динамическое давление  $P_{SW}$  (б) СВ, компоненты  $B_y$ ,  $B_z$  ММП (в), индекс  $Dst$  (з) и модуль производной по времени горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $|dB_H/dt|$  (д); начало отсчета времени (а–д) — 0 UT 07.11.2004. Показаны также распределения потока энергии высыпавшихся авроральных электронов  $J_E$  по геомагнитной широте  $\Phi$  в полуночном секторе для трех дней бури и в ближайший спокойный день (е); вертикальные штрихи отмечают широтные границы участка Северной железной дороги

В результате значения  $|dB_H/dt|$  оказываются даже выше, чем в бурю 2001 г., достигая 6.5 нТл/с, причем два максимума наблюдаются ночью 7/8 ноября и поздним вечером–ночью 9 ноября (рис. 3, д). Распределение авроральных высыпаний для трех дней этой бури показано для полуночного сектора на рис. 3, е. Во все три дня исследуемый участок Северной железной дороги попадает в зону интенсивных авроральных высыпаний. При этом абсолютные значения  $J_E$  несколько ниже, чем для бури 2001 г., и составляют в максимуме 14 эрг  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Максимальный уровень потока наблюдается 8 ноября на фазе восстановления после первого минимума  $Dst$ . Распределения на рис. 3, е соответствуют 23 UT, когда индекс  $Dst$  восстановился до  $-120$  нТл. При этом и интенсивность высыпаний, и экваториальное смещение зоны высыпаний были больше, чем 7 ноября. Девятого ноября интенсивность высыпаний снизилась примерно до 8 эрг  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ , а экваториальное смещение зоны высыпаний достигло максимума. В результате исследуемый участок попадал не на низкоширотный склон распределения, а на его максимум.

Во время этой бури сбои наблюдались также на Беломорском участке Октябрьской железной дороги. Так, 9 ноября в утреннем секторе с 9 до 11 местного времени (6–8 UT) ложная занятость рельсовой цепи фиксировалась вблизи остановочного пункта Шпаловой (географическая широта  $63.7^\circ$ , геомагнитная  $\Phi=60^\circ$ ).

Таким образом, возмущения во время бури 7–9 ноября характеризуются высокими значениями  $|dB_H/dt|$  в области авроральных высыпаний, которая охватывает геомагнитные широты до примерно  $50^\circ$ , а максимальные значения  $|dB_H/dt|$  близки к главной и восстановительной фазам бури. Приход возмущения СВ на фазе восстановления приводит к второму минимуму  $Dst$  и усиливает наблюдаемые эффекты.

Буря 20–21 ноября 2003 г. тоже относится к супербурям [Kleimenova et al., 2005]. Она началась скачком скорости и динамического давления СВ около 8 UT 20 ноября (рис. 4, а, б). Наиболее интенсивные колебания  $P_{SW}$  и ММП регистрировались до 17 UT, причем единичные ступеньки  $P_{SW}$  достигали 20 нТл, а минимальное значение  $B_z=-50$  нТл (рис. 4, б, в). В результате развивается буря с минимальным значением  $Dst=-422$  нТл в 21 UT (рис. 4, з). Локальная геомагнитная активность начинает возрастать с 9 UT одновременно с интенсивными возмущениями ММП и  $P_{SW}$ . Максимальные значения  $|dB_H/dt|$  около 7 нТл/с регистрируются в 14–18 и 22–23 UT (рис. 4, д). Максимальная интенсивность потока энергии  $J_E$  авроральных высыпаний составляет 13 эрг  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ . Экваториальное смещение зоны высыпаний выражено сильнее, чем во всех рассмотренных событиях: низкоширотная граница спускается ниже  $\Phi=46^\circ$  (рис. 4, е). В результате участок, на котором фиксировались сбои на Северной железной дороге, попадает в зону максимальной интенсивности высыпаний.

Для этой бури многочисленные сбои без видимой внешней причины фиксировались также на Беломорском участке Октябрьской железной дороги в диапазоне геомагнитных широт  $59.3^\circ < \Phi < 60.8^\circ$ . Сбои наблюдались с 20 до 25 ноября, т. е. до конца восстановительной фазы бури, на 16 перегонах Октябрьской железной дороги.

Во всех рассмотренных случаях, относящихся к главной и восстановительной фазам магнитных бурь, нарушения в работе систем автоматики наблюдались на субавроральных геомагнитных широтах.

## 2.2. Статистические закономерности

Сильные магнитные бури являются наиболее опасным источником сбоев. Однако такие события редки,

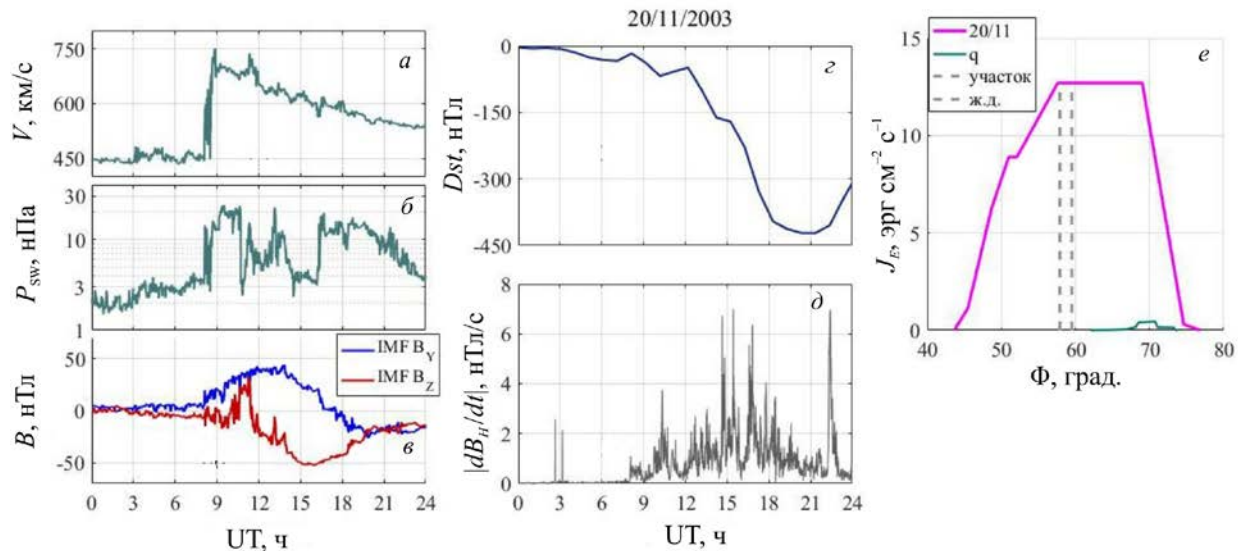


Рис. 4. Параметры межпланетной среды, геомагнитные возмущения и авроральные высыпания 20 ноября 2003 г. Обозначения те же, что и на рис. 3

поэтому существенный вклад в общую статистику дают сбои, связанные с умеренными геомагнитными возмущениями. Наличие архива сбоев по двум участкам Октябрьской железной дороги за пять лет — с 2002 по 2006 г. — позволяет дать статистическую оценку связи пространственного распределения сбоев и положения аврорального овала. Полное количество сбоев за пять лет составило около 1800 на Мурманском участке и 1300 — на Беломорском.

В работах [Воробьев и др., 2000, Воробьев, Ягодкина, 2005; Vorobjev et al., 2013] рассматриваются пространственные распределения высыпавшихся электронов в ограниченном интервале местного времени. Для статистической оценки целесообразно использовать параметр, характеризующий положение экваториальной границы овала для произвольного времени, поэтому воспользуемся аппроксимацией [Holzworth, Meng, 1975] модели [Фельдштейн, 1963] для геомагнитной широты экваториальной границы овала  $\Phi_{aur}$ .

Поскольку архив сбоев доступен не на непрерывном участке железной дороги, а на двух отдельных и классификация сбоев на них не унифицирована, будем рассматривать положение экваториальной границы овала во время сбоев отдельно по Мурманскому (авроральному) и Беломорскому (субавроральному) участкам. Следуя методике работы [Ягова и др., 2023], из всех сбоев мы выделили сбои группы 0, для которых не указана явная механическая, метеорологическая или связанная с человеческой деятельностью причина.

Результаты представлены на рис. 5 в виде зависимости  $P(\Phi_{aur} < \Phi_b)$  от  $\Phi_b$ , где  $P$  — вероятность прохождения границы овала  $\Phi_{aur}$  во время сбоя ниже геомагнитной широты  $\Phi_b$ . Как для всех сбоев (рис. 5, а), так и для сбоев группы 0 (рис. 5, б) кривая проходит ниже в моменты времени, когда сбои регистрировались на более низкоширотном Беломорском участке. Это позволяет предположить, что ши-

ротное распределение сбоев зависит от положения экваториальной границы овала.

В качестве нулевой гипотезы выбрано предположение об одинаковом распределении  $\Phi_{aur}$  для моментов времени, когда сбои наблюдались на авроральном (Мурманском) и субавроральном (Беломорском) участках Октябрьской железной дороги. Для проверки этой гипотезы были выполнены тесты с использованием непараметрических критериев как для независимых показаний (Манна—Уитни), так и для зависимых (Вилкоксона) [Кобзарь, 2006], позволяющие сделать выводы о равенстве или неравенстве распределений в этих наборах. Критерий Манна—Уитни определяет, достаточно ли мала зона перекрещивающихся значений между двумя рядами (ранжированным рядом значений параметра в первой выборке и таким же рядом во второй выборке). Чем меньше значение критерия, тем вероятнее, что различия между значениями параметра в выборках достоверны. Критерий Вилкоксона — это непараметрический статистический тест (критерий), используемый для проверки различий между двумя выборками парных или независимых измерений по уровню какого-либо количественного признака, измеренного в непрерывной или в порядковой шкале. Тест Вилкоксона выполняется путем ранжирования значений в каждой выборке, затем вычисляются суммы рангов для каждой выборки. Для проведения теста Вилкоксона количество показаний в данных двух наборов уравнивалось путем создания случайных выборок из данных набора превосходящей длины. Анализ проводился по пяти выборкам.

Анализ показал, что нулевая гипотеза может быть отвергнута с уровнем значимости 5 % по критерию Манна—Уитни и 1 % — по критерию Вилкоксона. Таким образом, относительная частота сбоев на авроральном и субавроральном участках железной дороги зависит от широты экваториальной границы аврорального овала. Для авроральных участков наиболее



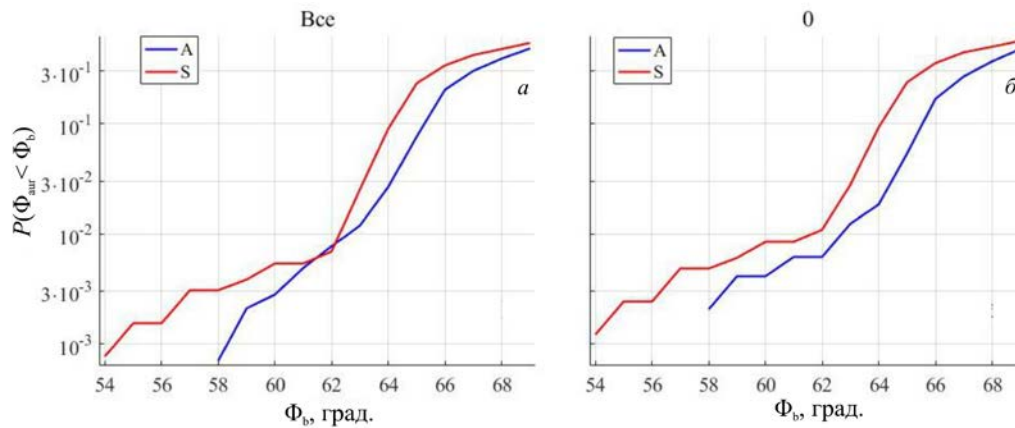


Рис. 5. Вероятность того, что экваториальная граница овала  $\Phi_{aur}$  проходит ниже заданной геомагнитной широты  $\Phi_b$  в моменты сбоев на Мурманском (авроральном, А) и Беломорском (субавроральном, S) участках Октябрьской железной дороги: а — все сбои; б — сбои без явной внешней причины (группа 0)

опасными являются умеренные возмущения. Для более интенсивных возмущений вероятность сбоев на авроральных широтах уменьшается, а зона высокого риска спускается на субавроральные широты.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнен анализ широтного распределения интенсивности высыпаний, положения экваториальной границы аврорального овала и модуля производной по времени горизонтальной компоненты геомагнитного поля  $|dB_H/dt|$  на ст. Карпогоры во время сильных магнитных бурь, для которых зафиксирован рост продолжительности сбоев железнодорожной автоматики [Eroshenko et al., 2010]. В спокойное время рассматриваемый участок Северной железной дороги попадает на субавроральные широты. Во время всех рассмотренных бурь этот участок лежал в области интенсивных авроральных высыпаний, а максимальные суточные значения  $|dB_H/dt|$  превышали 5 нТл/с. Для супербурь 2003 и 2004 гг. сбои регистрировались также на субавроральном (Беломорском) участке Октябрьской железной дороги (для бури 2001 г. данные по сбоям на Октябрьской железной дороге не были доступны). Опасные уровни возмущений возникали как на главной, так и на восстановительной фазах бури.

Статистический анализ данных архива сбоев на двух участках Октябрьской железной дороги подтвердил наличие связи между положением экваториальной границы аврорального овала и пространственным распределением сбоев. В дни, когда сбои наблюдались на более низкоширотном Беломорском участке, регистрировалось существенное смещение к югу экваториальной границы овала. Этот эффект наиболее ярко проявлялся при самых сильных возмущениях, приводящих к максимальному смещению экваториальной границы овала: при  $\Phi_{aur} < 55^\circ$  подавляющее большинство сбоев было зафиксировано на субавроральных широтах.

Возникающий эффект слабо зависит от типа указанного в первичных записях сбоя. Возможные причины этого могут быть связаны не только с неточной исходной классификацией или косвенным влиянием возмущений космической погоды через ме-

теорологические и биологические факторы, как предполагалось в работе [Ягова и др., 2023]. На электрифицированных железных дорогах осуществляется возврат части тока в сеть по рельсовой цепи. Как при использовании дроссель-трансформатора, так и при схеме с бесстыковым рельсом квазипостоянные ГИТ могут вызвать некорректную работу автоматики, определяющей занятость перегона [Patterson et al., 2023a, b]. Степень этого влияния зависит от асимметрии цепи [Qian et al., 2016; Костроминов, Ложкин, 2021]. Поскольку изменение сопротивления рельса или в более общем случае всей системы рельс–балласт–земля влияет на сбалансированность токовой цепи, возникает ситуация, когда изменение сопротивления, вызванное человеческой деятельностью или связанное с погодными условиями, может длительно существовать без последствий, а проявиться в виде сбоя во время магнитного возмущения.

### ВЫВОДЫ

1. Во время сильных магнитных бурь 23-го солнечного цикла многочисленные сбои регистрировались на участках Северной и Октябрьской железных дорог, лежащих на геомагнитных широтах ниже  $60^\circ$ , где наблюдались интенсивные высыпания электронов с энергиями до 30 кэВ с потоком энергии выше  $7 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и локальная геомагнитная возмущенность превышала 5 нТл/с.

2. Существует статистически значимая связь между геомагнитной широтой экваториальной границы аврорального овала  $\Phi_{aur}$  и относительной частотой регистрации сбоев на авроральном (Мурманском) и субавроральном (Беломорском) участках Октябрьской железной дороги: при интенсивных возмущениях, приводящих к существенному смещению  $\Phi_{aur}$  к югу, возрастает доля сбоев на субавроральном участке.

3. Низкоширотная граница зоны, в которой при геомагнитных возмущениях происходят связанные с ГИТ сбои в работе железнодорожной автоматики, может быть приближенно оценена по широте экваториальной границы аврорального овала. Для более точных оценок, позволяющих принимать техниче-

ские решения, необходимы многолетние данные по сбоям на конкретной железной дороге.

Работа поддержана грантом РФФ № 21-77-30010.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воробьев В.Г., Ягодкина О.И. Влияние магнитной активности на глобальное распределение зон авроральных вторжений. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2005. Т. 45. С. 467–473.

Воробьев В.Г., Громова Л.И., Реженев Б.В. и др. Вариации положения границ плазменных вторжений и аврорального свечения в ночном секторе. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2000. Т. 40, № 3. С. 79–85.

Касинский В.В., Птицына Н.Г., Ляхов Н.Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики и телемеханики. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2007. Т. 47. С. 714–718.

Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

Костроминов А.М., Ложкин Р.О. Влияние геоиндуцированных токов на дроссель-трансформаторы рельсовых цепей железнодорожной автоматики. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2021. Т. 18. С. 222–228. DOI: [10.20295/1815-588X-2021-2-222-228](https://doi.org/10.20295/1815-588X-2021-2-222-228).

Пилипенко В.А., Черников А.А., Соловьев А.А. и др. Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Т. 23, ES2008. DOI: [10.2205/2023ES000824](https://doi.org/10.2205/2023ES000824).

Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А. Геомагнитные пульсации Pc5/P13 и геоиндуцированные токи. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2021. Т. 85. С. 445–450. DOI: [10.31857/s0367676521030236](https://doi.org/10.31857/s0367676521030236).

Фельдштейн Я.И. Некоторые вопросы морфологии полярных сияний и магнитных возмущений в высоких широтах. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1963. Т. 3, № 2. С. 227–239.

Ягова Н.В., Розенберг И.Н., Гвишиани А.Д. и др. Исследование влияния геомагнитной активности на функционирование систем железнодорожной автоматики в Арктической зоне России. *Арктика: экология и экономика*. 2023. Т. 13. С. 341–352. DOI: [10.25283/2223-4594-2023-3-341-352](https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-341-352).

Akasofu S.I. Interplanetary energy flux associated with magnetospheric substorms. *Planet. Space Sci.* 1979. Vol. 27. P. 425–431.

Beggan C. Sensitivity of geomagnetically induced currents to varying auroral electrojet and conductivity models. *Earth Planet Space*. 2015. Vol. 67, 24. DOI: [10.1186/s40623-014-0168-9](https://doi.org/10.1186/s40623-014-0168-9).

Boteler D.H. Modeling geomagnetic interference on railway signaling track circuits. *Space Weather*. 2021. Vol. 19, e2020SW002609. DOI: [10.1029/2020SW002609](https://doi.org/10.1029/2020SW002609).

Chisham G., Burrell A.G., Thomas E.G., Chen Y.-J. Ionospheric boundaries derived from auroral images. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. Vol. 127, e2022JA030622. DOI: [10.1029/2022JA030622](https://doi.org/10.1029/2022JA030622).

Eroshenko E.A., Belov A.V., Boteler D., et al. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia. *Adv. Space Res.* 2010. Vol. 46. P. 1102–1110. DOI: [10.1016/j.asr.2010.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.017).

Holzworth R.H., Meng C.-I. Mathematical representation of the auroral oval. *Geophys. Res. Lett.* 1975. Vol. 2. P. 377–380. DOI: [10.1029/GL002i009p00377](https://doi.org/10.1029/GL002i009p00377).

Hu Z.-J., Yang Q.-J., Liang J.-M., et al. Variation and modeling of ultraviolet auroral oval boundaries associated with interplanetary and geomagnetic parameters. *Space Weather*. 2017. Vol. 15. P. 606–622. DOI: [10.1002/2016SW001530](https://doi.org/10.1002/2016SW001530).

Hu Z.-J., Han B., Zhang Y., et al. Modeling of ultraviolet aurora intensity associated with interplanetary and geomagnetic parameters based on neural networks. *Space Weather*. 2021. Vol. 19, e2021SW002751. DOI: [10.1029/2021SW002751](https://doi.org/10.1029/2021SW002751).

Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Manninen J., Ranta A. Unusual strong quasi-monochromatic ground Pc5 geomagnetic pulsations in the recovery phase of November 2003 superstorm. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 2621–2634. DOI: [10.5194/angeo-23-2621-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-2621-2005).

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. P. 1281–1292. DOI: [10.1029/2019SW002250](https://doi.org/10.1029/2019SW002250).

Manninen J., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., et al. Ground-based observations during the period between two strong November 2004 storms attributed to steady magnetospheric convection. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113, A00A09. DOI: [10.1029/2007JA012984](https://doi.org/10.1029/2007JA012984).

Milan S.E. Both solar wind-magnetosphere coupling and ring current intensity control of the size of the auroral oval. *Geophys. Res. Lett.* 2009. Vol. 36, L18101. DOI: [10.1029/2009GL039997](https://doi.org/10.1029/2009GL039997).

Newell P.T., Sotirelis T., Ruohoniemi J.M., et al. OVA-TION: Oval variation, assessment, tracking, intensity, and online nowcasting. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1039–1047. DOI: [10.5194/angeo-20-1039-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-1039-2002).

Ohma A., Laundal K.M., Madelaire M., et al. Robust estimates of spatiotemporal variations in the auroral boundaries derived from global UV imaging. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2024. Vol. 129, e2023JA032021. DOI: [10.1029/2023JA032021](https://doi.org/10.1029/2023JA032021).

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*. 2023a. Vol. 21, e2022SW003385. DOI: [10.1029/2022SW003385](https://doi.org/10.1029/2022SW003385).

Patterson C.J., Wild J.A., Boteler D.H. Modeling “wrong side” failures caused by geomagnetically induced currents in electrified railway signaling systems in the UK. *Space Weather*. 2023b. Vol. 21, e2023SW003625. DOI: [10.1029/2023SW003625](https://doi.org/10.1029/2023SW003625).

Piitsyna 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. *Adv. Space Res.* 2008. Vol. 42. P. 1510–1514. DOI: [10.1016/j.asr.2007.10.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.10.015).

Qian X., Tian H., Yin Y., et al. Geomagnetic storms’ influence on intercity railway track circuit. *Urban Rail Transit*. 2016. Vol. 2. P. 85–91. DOI: [10.1007/s40864-016-0040-2](https://doi.org/10.1007/s40864-016-0040-2).

Viljanen A., Nevanlinna H., Pajunpaa K., Pulkkinen A. Time derivative of the horizontal geomagnetic field as an activity indicator. *Ann. Geophys.* 2001. Vol. 19. P. 1107–1118. DOI: [10.5194/angeo-19-1107-2001](https://doi.org/10.5194/angeo-19-1107-2001).

Viljanen A., Tanskanen E.I., Pulkkinen A. Relation between substorm characteristics and rapid temporal variations of the ground magnetic field. *Ann. Geophys.* 2006. Vol. 24. P. 725–733. DOI: [10.5194/angeo-24-725-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-725-2006).

Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. Auroral precipitation model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. Vol. 102. P. 157–171. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.007).

Wik M., Viljanen A., Pirjola R., et al. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden. *Space Weather*. 2008. Vol. 6, S07005. DOI: [10.1029/2007SW000343](https://doi.org/10.1029/2007SW000343).

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. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27. P. 1775–1787. DOI: [10.5194/angeo-27-1775-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1775-2009).

Wintoft P., Viljanen A., Wik M. Extreme value analysis of the time derivative of the horizontal magnetic field and computed electric field. *Ann. Geophys.* 2016. Vol. 34. P. 485–491. DOI: [10.5194/angeo-34-485-2016](https://doi.org/10.5194/angeo-34-485-2016).

### Как цитировать эту статью:

Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А., Ягодкина О.И., Гаранин С.Л. Пространственное распределение авроральных высыпаний и сбоев в работе железнодорожной автоматики на севере европейской части России. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 4. С. 114–121. DOI: [10.12737/szf-104202412](https://doi.org/10.12737/szf-104202412).