

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

Н. В. Ягова^{1,2}, И. Н. Розенберг³, А. Д. Гвишиани^{1,2}, Я. А. Сахаров⁴, С. Л. Гаранин⁵,
В. А. Воронин⁶, В. А. Пилипенко^{1,2}, И. А. Дубчак⁶

¹ Институт физики Земли имени О. Ю. Шмидта РАН (Москва, Российская Федерация)

² Геофизический центр РАН (Москва, Российская Федерация)

³ Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация)

⁴ Полярный геофизический институт (Апатиты, Российская Федерация)

⁵ Институт геохимии и аналитической химии имени В. И. Вернадского РАН
(Москва, Российская Федерация)

⁶ Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации
и связи на железнодорожном транспорте (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 6 января 2023 г.

Для цитирования

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, № 3. — С. 341—352. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-3-341-352.

Исследовано влияние геомагнитной активности на функционирование железнодорожной автоматики на северном участке Октябрьской железной дороги в 2001–2006 гг. Для анализа геомагнитной активности использовались индексы, характеризующие возмущенность на разных масштабах — от глобального до локального. Обнаружено, что геомагнитная активность выше в дни, когда зафиксированы сбои, чем в безаварийные дни. Этот эффект проявляется как в геомагнитном индексе Dst, характеризующем интенсивность магнитных бурь, так и в индексах авроральной активности AE, EI и локальной мощности геомагнитных вариаций в диапазоне первых миллигерц. Наибольшие отличия между днями со сбоями и без таковых наблюдаются для интегральных значений индексов за два-четыре дня. При этом не выявлено значимых отличий между распределениями для сбоев двух групп, где в первую включены сбои, имеющие явную причину, не связанную с геомагнитной возмущенностью, а во вторую — сбои, для которых такая причина не была указана.

Ключевые слова: космическая погода, геомагнитные возмущения, железные дороги.

Введение

Наиболее ярким проявлением влияния космической погоды на наземные технологические системы является воздействие геоиндуцированных токов (ГИТ) на электрические сети, и именно этому кругу вопросов посвящено большинство публикаций по теме, в то время как вызванные геомагнитными возмущениями нарушения в работе технических средств железных дорог исследованы хуже, и можно

указать только на немногие публикации на эту тему (см. обзор [1]). Историческим первым описанным событием, связанным с аварией железнодорожной сигнализации, явилась магнитная буря в мае 1921 г. [2]. В более позднее время можно выделить бурю в июле 1982 г., когда сбои в работе железнодорожной автоматики были отмечены на юге Швеции [3]. Во время магнитных бурь на железной дороге возникли проблемы со световой сигнализацией: железнодорожный светофор переключался с красного на зеленый свет и обратно без видимых причин.

В России выполнен ряд работ, в которых исследовалась связь сбоев в работе железнодорожной



Рис. 1. Схема расположения изучаемого участка и обсерватории Ловозеро (LOZ). При создании рисунка использовалось приложение Яндекс карты
Fig. 1. Layout of the study site and the Lovozero Observatory (LOZ). When creating the drawing, the Yandex maps application is used

сигнализации с геомагнитными возмущениями. Внезапные прекращения функционирования систем управления движением поездов, повлекшие нарушение графика движения, неоднократно фиксировались на Октябрьской железной дороге [4]. В отличие от других нарушений нормальной работы устройств автоматики сбои, связанные с магнитными бурями, характеризовались восстановлением работоспособности систем без вмешательства оперативно-ремонтного персонала. Были задокументированы сбои в работе систем автоматики Северной железной дороги [5]. При анализе развития сбоев в работе систем сигнализации во время 16 сильных магнитных бурь за 1989—2005 гг. было выявлено, что практически каждая сильная буря проявлялась в аномалиях работы железнодорожной автоматики. Распределение зарегистрированных аномалий от местного времени с двумя максимумами в ночные и утренние часы со-

гласовывалось с известным распределением периодов развития ГИТ [6]. Было установлено, что сбои в работе железнодорожной автоматики Северной и Октябрьской железных дорог во время сильных геомагнитных бурь 23-го цикла солнечной активности (2009—2020 гг.) развивались почти синхронно и в тесной связи с проявлением значительных геомагнитных возмущений [7], а в [8] была установлена связь между длительностью сбоев в работе систем автоматики и уровнем геомагнитной активности.

Исследования связи геомагнитной возмущенности и сбоев на железной дороге вне бурь, насколько известно авторам, не проводились. Задача о влиянии космической погоды на функционирование технических систем является многофакторной, и возможности ее решения ограничены фрагментарностью доступных для анализа данных и не полностью исследованными взаимными зависимостями влияющих факторов. Анализ современного состояния и перспектив исследований влияния возмущений космической погоды на объекты железнодорожной инфраструктуры в российской Арктике можно найти в обзоре [9].

В настоящей работе выполнено статистическое исследование связи частоты сбоев на северном участке Октябрьской железной дороги с параметрами, характеризующими геомагнитную активность на разных масштабах — от

глобальной во время бурь до местной. Для анализа используются те же массивы сбоев, что и в [6; 10]. Кроме геомагнитных бурь и суббурь исследуется влияние региональной магнитной активности, а анализ проводится на временных масштабах от 1 до 4 сут. Значимость всех выявленных закономерностей проверяется статистическими тестами.

Данные и обработка

Цифровой архив сбоев

Для анализа использовался архив журнальных записей запроотоколированных сбоев в работе железнодорожной автоматики на участке Октябрьской железной дороги от станции Канда拉克ша (67,15° с. ш.) до станции Никель-Мурманский (69,4° с. ш.) с 2001 по 2006 гг. (рис. 1).

Архив журнальных записей аномалий и их причин был переведен в цифровую форму в виде та-

блиц Excel с текстовым указанием причины сбоев. Всего было проанализировано более 1800 записей о сбоях за шесть лет. Для дальнейшего анализа программным путем были выделены следующие группы событий:

- (0) — период без сбоев длительностью от 1 сут.
- (1) — сбои, для которых не была найдена явная механическая, метеорологическая или иная внешняя причина. Априорно предполагается, что эти сбои с большей вероятностью могут вызваться возмущениями космической погоды.
- (2) — сбои, для которых такая причина указана. Чаще всего это механические повреждения, метеорологические причины (попадание льда и песка в стрелки) или вмешательство посторонних лиц.

Все вычисления проводились средствами языка программирования Python на базе встроенных в него средств статистического анализа, библиотек Pandas, NumPy и SciPy.Stats.

Параметры геомагнитной возмущенности

Предположительно связь сбоев с космической погодой может быть обусловлена теллурическими полями значительной амплитуды, которые в зависимости от полярности могут приводить как к ложной занятости перегона, так и к отсутствию сигнала о занятости. Наиболее сильные теллурические поля и токи вызываются геомагнитными бурями, интенсивность которых измеряется индексом Dst. Буря характеризуется резким началом, снижение индекса до минимальных значений происходит за несколько десятков минут, а восстановление — несколько дней (обычно три-семь), в течение которых высокая магнитная возмущенность наблюдается на всех широтах.

В области высоких широт выделяется область овала полярных сияний, где происходят наиболее интенсивные возмущения — суббури, которые могут быть как элементарными возмущениями во время магнитной бури, так и самостоятельными событиями, локализованными в ночном секторе [11]. Интенсивность авроральных проявлений характеризуется авроральными планетарными индексами (AE, AL, AU) и их региональным аналогом для территории Скандинавии и северо-запада России (EI).

Кроме глобальных процессов — бурь и суббурь наблюдаются квазипериодические вариации геомагнитного поля — пульсации. Самые интенсивные пульсации характеризуются периодами от 2 до 20 мин и амплитудами от десятков до нескольких сотен нанотесл (нТл). Они возникают на авроральных широтах и являются эффективным источником ГИТ [12; 13]. Эти пульсации обладают максимальными периодами и амплитудами из всех наблюдаемых в магнитосфере и на поверхности Земли и по классификации Международной геофизической ассоциации IAGA относятся к подклассам Pc5 (pulsations continuous) и Pi3 (pulsations irregular).

Для количественной оценки влияния геомагнитных возмущений на разных пространственных и временных масштабах на вероятность сбоев в ра-

боте железнодорожной автоматики используются индексы геомагнитной активности. Интенсивность магнитных бурь и авроральных суббурь учитывается с помощью планетарных и региональных индексов, а влияние пульсаций геомагнитного поля учитывается по их интенсивности на станции Ловозеро, расположенной на наименьшем расстоянии от исследуемого участка железной дороги (код станции LOZ, 67,97° с. ш., 35,08° в. д.) (рис. 1). Для выделенных групп сбоев сравниваются распределения следующих параметров, характеризующих уровень геомагнитной возмущенности:

- максимальное за время τ значение модуля индекса Dst;
- медианные значения индекса авроральной активности AE;
- спектральная мощность вариаций производной широтной компоненты геомагнитного поля dB_y/dt на станции LOZ, относящейся к сети магнитометрических измерений IMAGE [14].

Выбор точки наблюдения и параметров учета геомагнитных пульсаций обоснован в работах по исследованию связи ГИТ с пульсациями по измерениям на северо-западе России [15; 16]. Спектральная плотность мощности (PSD) вариаций компонент геомагнитного поля вычислялась в окне 64 мин с шагом 5 мин по методу Блэкмана — Тьюки [17], и по ней оценивалась интегральная спектральная мощность W в полосе частот 1,2—5,4 мГц. Величина W_y характеризует интенсивность возмущений широтной компоненты геомагнитного поля, дающей максимальный вклад в ГИТ в меридионально ориентированных проводниках. Она является адаптацией УНЧ индекса [18] к задаче о вызванных ГИТ сбоях на исследуемом участке железнодорожной сети.

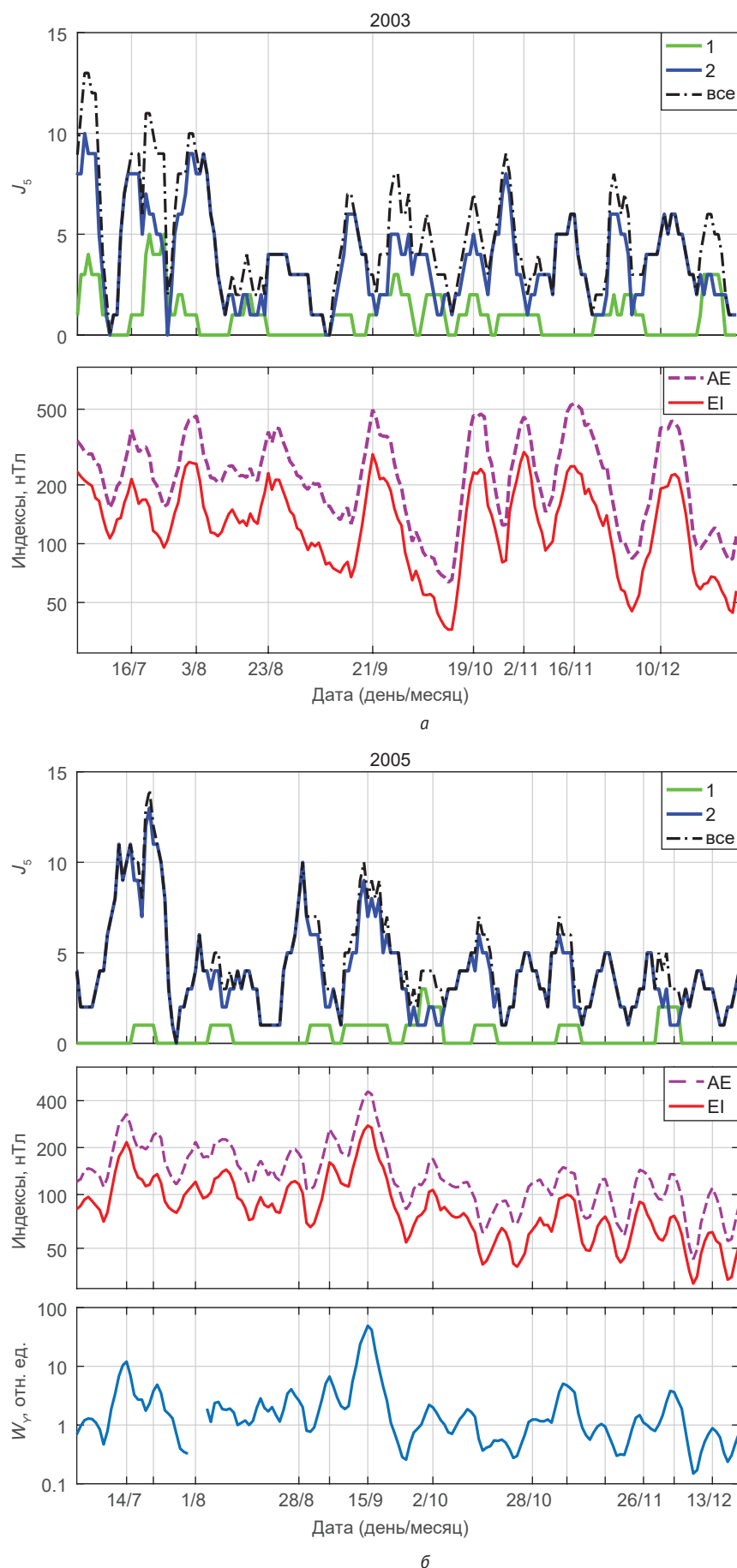
Для событий группы 0 продолжительность интервала без сбоев является варьируемым параметром и входит в длительность интервала, по которому происходит расчет. Таким образом, верхняя граница длительности τ определяется достаточным количеством событий в группе 0 и не превышает 5 сут.

Результаты обработки

Примеры коррелированных изменений частоты сбоев и геомагнитной активности

Исследуемый интервал относится к 23-му циклу солнечной активности и включает как период максимума (2001—2002 гг.), так и фазу спада (2003—2006 гг.). Следует отметить, что наиболее сильные магнитные бури в течение цикла наблюдались в 2003—2004 гг., так как вариации геомагнитной и солнечной активности не точно совпадают по фазе. Глобальная магнитная возмущенность связана с магнитными бурями, а для высокоширотной области, в которой лежит исследуемый участок, геомагнитная активность связана прежде всего с возмущениями крупномасштабных авроральных токов, текущих вдоль геомагнитной широты.

На рис. 2 приведены примеры коррелированных вариаций частоты сбоев и авроральной активнос-



сти для двух полугодовых интервалов с июля по декабрь 2003 и 2005 гг. Показана средняя за пять дней частота сбоев и индексы авроральной активности с тем же осреднением. Используются планетарный индекс авроральной активности AE и региональный индекс авроральной активности EI. Из рисунка видно, что поведение осредненных авроральных индексов отличается слабо. Для 2005 г. приведен также локальный индекс пульсационной активности W_p . Для этого индекса максимумы наблюдаются преимущественно в те же моменты, что и для AE, а контраст между максимальными и минимальными значениями выше, чем для авроральных индексов. Для большинства максимумов геомагнитной активности наблюдаются и максимумы в частоте сбоев. При этом количество сбоев группы 1 недостаточно для анализа временных вариаций, а полное количество сбоев в основном определяется сбоями группы 2.

Распределения индексов геомагнитной активности в зависимости от типа сбоев

Для всего периода наблюдений визуальный просмотр вариаций индексов геомагнитной активности и числа сбоев не показывает очевидной связи. Возмож-

Рис. 2. Примеры вариаций осредненной за 5 дней частоты сбоев J_5 , индексов авроральной активности AE и EI в 2003 и 2005 гг. На нижних панелях рис. 2а и 2б показан индекс локальной пульсационной активности W_p . Рисунок создан авторами в среде MATLAB
Fig. 2. Examples of variations in the 5-day-mean failure occurrence J_5 , auroral activity indexes AE and EI in 2003 and 2005. The bottom panels of Fig. 2a and 2b show local fluctuating activity (ULF) index W_p . The Figure is created by the authors in the MATLAB environment

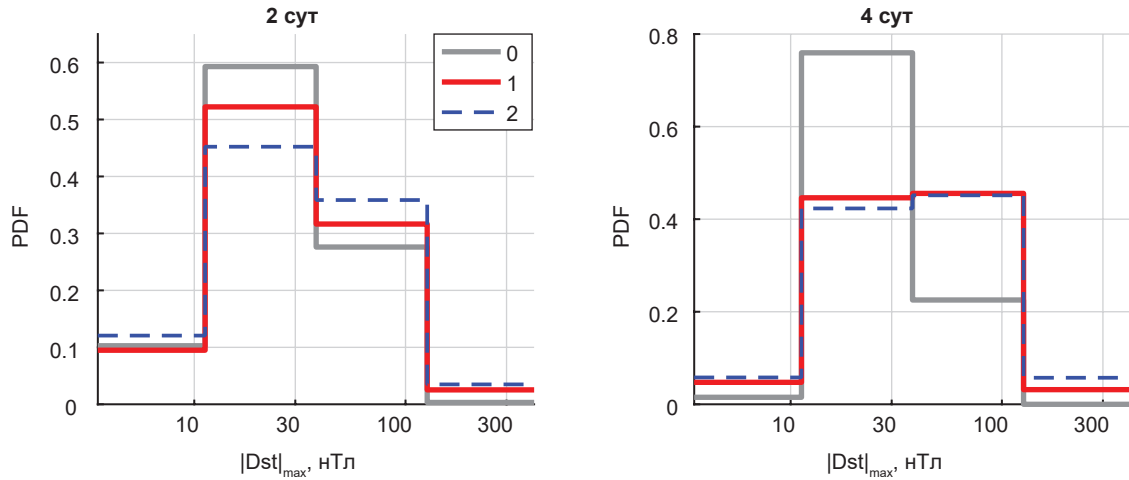


Рис. 3. Распределения максимального по модулю за время τ (2 и 4 суток для левой и правой панелей соответственно) значения индекса $|Dst|_{\max}$ для трех групп событий: 0 — нет сбоев за все время на всем участке пути, 1/2 — сбои с явной механической причиной либо без нее и т. п. Рисунок создан авторами в среде MATLAB

Fig. 3. Distributions of the maximum modulo for the time τ (2 and 4 days for the left and right panels respectively) of the index value $|Dst|_{\max}$ for the three groups of events: 0 — no failures for the entire time on the whole section of the path, 1/2 — failures without/with evident mechanical or other external reason. The Figure is created by the authors using MATLAB environment

ное наличие более слабой связи геомагнитных вариаций и сбоев железнодорожной автоматики мы попытаемся выделить с помощью статистического анализа. Для всех исследуемых индексов геомагнитной активности результаты представлены в виде эмпирических функций распределения (PDF) по выборкам интервалов без сбоев (группа 0) и для двух групп сбоев (1 и 2) при разных значениях времени осреднения τ . Так как для бури наиболее важным параметром является максимальное значение его абсолютного значения $|Dst|_{\max}$, то для каждого момента времени t рассчитывается $|Dst|_{\max}$ в интервале $(t-\tau, t)$.

Функции распределения приведены для значений $\tau = 2$ и 4 сут на рис. 3. Из рисунка видно, что в распределения для групп со сбоями больший вклад вносят значения $|Dst|_{\max} > 30$ нТл для обоих значений τ . Таким образом, вероятность сбоя возрастает после бури любой интенсивности, включая слабые. При этом доля безбуревых интервалов $|Dst|_{\max} < 30$ нТл для интервалов со сбоями меньше, чем для интервалов без сбоев. Различие между распределениями для групп 1 и 2 (есть сбои) и 0 (нет сбоев) усиливается с ростом τ , а отличия между распределениями для интервалов со сбоями (группы 1 и 2) малы. Таким образом, интервалы без сбоев и со сбоями характеризуются разными уровнями магнитной активности, а влияние магнитной бури, даже слабой, может сказываться в течение 3—4 сут.

Магнитная буря — глобальное явление, но ее проявления отличаются на разных геомагнитных широтах. Рассматриваемый участок железной дороги лежит на авроральных широтах, где потенциально опасные ГИТ возникают во время авроральных суббурь как во время бурь, так и вне бури, причем вклад безбуревых интервалов преобладает [16].

Рассмотрим связь сбоев и возмущений типа суббури, используя индекс авроральной активности АЕ. Для этого параметра важны не только его экстремальные значения, но и общий уровень активности в течение длительного времени, и мы будем рассматривать медианные за время τ значения АЕ. Распределения для тех же значений τ , что и на рис. 3, показаны на рис. 4.

Доля интервалов высокой возмущенности $AE > 300$ нТл оказывается выше для интервалов со сбоями, а низкой ($AE < 300$ нТл) — для интервалов без сбоев. Отличие между распределениями увеличивается для больших значений времени τ . Кроме того, для $\tau = 4$ сут отличия становятся заметны при меньших уровнях возмущенности ($AE > 100$ нТл), т. е. длительное воздействие слабых возмущений аналогично кратковременному воздействию сильных.

Таким образом, зависимости вероятности сбоев от индексов магнитной бури Dst и авроральной суббури АЕ в целом аналогичны — вероятность сбоев растет с ростом интегрального за два-четыре дня уровня возмущенности. Для авроральной активности можно также выделить эффект кумулятивного действия слабых возмущений.

До сих пор рассматривались глобальные и региональные источники геомагнитных возмущений, создаваемые крупномасштабными токовыми системами. Однако высокие амплитуды ГИТ могут возникать и как ответ на геомагнитные пульсации Pc5/Pi3, интенсивность которых оценивается в настоящей работе с помощью определенного по станции LOZ локального индекса. Распределения для индекса локальной интенсивности геомагнитных вариаций W_y в формате, аналогичном рис. 3 и 4, представлены на рис. 5 для значений времени $\tau = 1$ и 4 сут. Если для $\tau = 1$ сут разница в масштабе рисунка практически

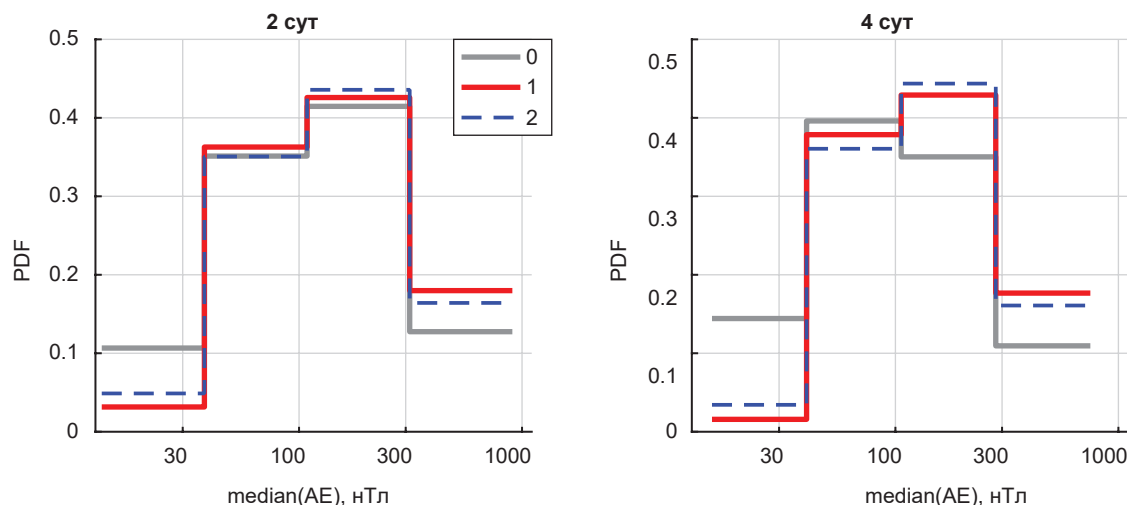


Рис. 4. Распределения медианного за время τ (2 и 4 сут для левой и правой панелей соответственно) значения индекса AE для трех групп событий. Рисунок создан авторами в среде MATLAB
Fig. 4. Distributions of AE index median values for time interval τ (2 and 4 days for left and right panels, respectively). The Figure is created by the authors using MATLAB environment

незаметна, то для $\tau = 4$ сут распределения для дней со сбоями обогащены высокими значениями мощности пульсаций, а для дней без сбоев — низкими.

В качестве параметра, количественно описывающего различия в распределениях для сбоев (группа 0) и сбоев группы 1, используем отношение R_{10} между средними значениями индексов в группах 1 и 0. Значения больше 1 соответствуют более высоким уровням активности. Сравнение зависимости от времени осреднения отношения R_{10} для индексов AE и W_y приведено на рис. 6. Для времени $\tau < 2$ сут

сильнее сказывается влияние AE, а на больших временах — локальной мощности пульсаций.

Проверка статистической значимости выявленных отличий

Проведенный анализ дал основания предположить различия в распределении данных со сбоями и без сбоев. Для подтверждения статистической достоверности найденных отличий дополнительно были проведены статистические тесты, результаты которых представлены в табл. 1:

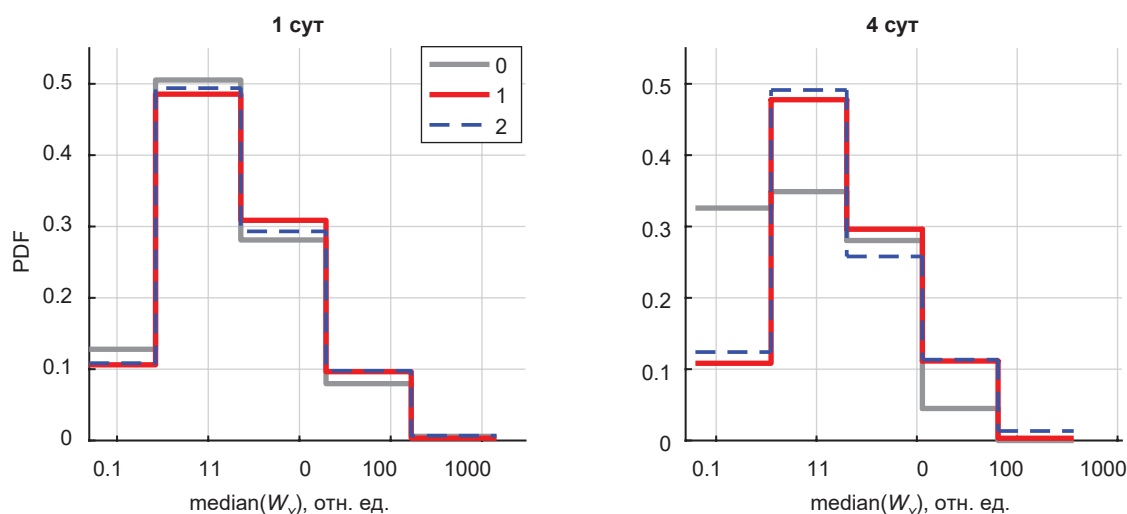


Рис. 5. Распределения медианного за время τ (1 и 4 сут для левой и правой панелей соответственно) значения индекса локального W_y для трех групп событий. Рисунок создан авторами в среде MATLAB
Fig. 5. Distributions of median values of local W_y index for three groups of events (time interval $\tau = 1$ and 4 days for left and right panels, respectively). The Figure is created by the authors using MATLAB

- Тест ANOVA (односторонний дисперсионный анализ) проверяет нулевую гипотезу о том, что две группы (или более) имеют одинаковое среднее значение по совокупности. Тест применяется к образцам из двух или более групп, возможно, разного размера [19].
- Н-тест Краскела — Уоллиса (непараметрическая версия ANOVA) проверяет нулевую гипотезу о том, что медианы совокупности всех групп равны [20].
- U-критерий Манна — Уитни — непараметрический тест с нулевой гипотезой о совпадении распределений, лежащим в основе сравниваемых выборок [20].
- Тест Бруннера — Мюнзеля — непараметрический тест, для которого нулевая гипотеза предполагает равную долю значений, превышающих заданный порог в обеих группах. В отличие от U-критерия Вилкоксона — Манна — Уитни он не требует предположения об эквивариантности двух групп и не предполагает, что распределения одинаковы [21].

Для всех проверенных индексов и значений времени τ не наблюдаются статистически значимые отличия между сбоями двух групп. При этом для всех индексов при $\tau = 4$ сут все тесты выявляют значимые отличия между распределениями индексов для интервалов без сбоев и со сбоями. Для времени $\tau = 1$ сут такие отличия наблюдаются только для AE индекса (группы 0—2), а для $\tau = 2$ сут отличия между группами 0 и 2 оказываются значимыми для индексов AE и W_y для всех тестов, а для Dst — для всех кроме одного. Для удобства те комбинации индексов и времени τ , для которых все проведенные тесты для обеих групп сбоев свидетельствуют о наличии значимых отличий, выделены в таблице зеленой заливкой.

Обсуждение

Ранее исследовалась статистическая связь между уровнем геомагнитной активности и длительностью сбоев в работе систем автоматики Восточно-Сибирской железной дороги в 2004 г. [8]. Анализ аномалий и их причин, указанных в рапортах и журналах железнодорожных служб, показал, что примерно 45% аномалий были заведомо не связаны с геомагнитными факторами. Авторы установили, что суммарная суточная длительность оставшихся аномалий на всех участках дороги возрастает в несколько раз при развитии геомагнитной бури. Наведенные в железнодорожных системах изменяющиеся магнитными полями ГИТ предположительно вызывают насыщение дроссель-трансформаторов рельсовых цепей (такие случаи неоднократно отмечались на Октябрьской железной дороге) [4]. При подмагничивании дроссель-трансформаторов напряжение сигнального тока в рельсовой цепи уменьшается, а также изменяется его фаза, и путевые реле выключаются. В результате возникает ложная занятость путей.

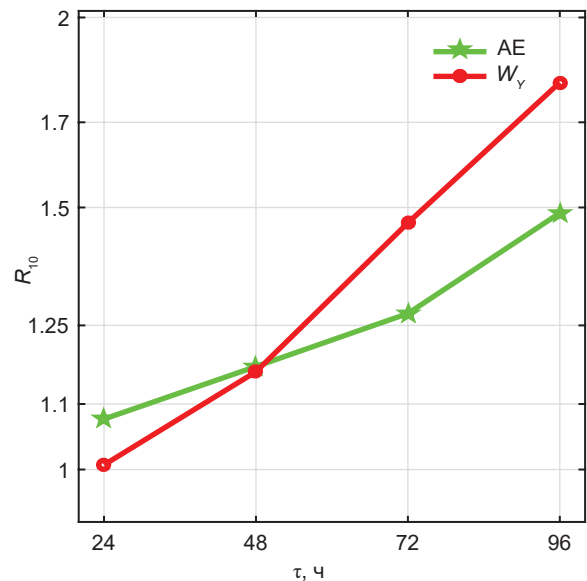


Рис. 6. Зависимость параметра R_{01} для индексов AE и W_y в зависимости от времени осреднения τ . Рисунок создан авторами в среде MATLAB

Fig. 6. Dependence of the R_{01} parameter for AE and W_y indices depending on the averaging time τ . The Figure is created by the authors using MATLAB

Приведенный в настоящей работе анализ сбоев на северном участке Октябрьской железной дороги в 2001—2006 гг. показал, что распределения индексов геомагнитной активности различны для интервалов без сбоев и интервалов, во время которых зафиксированы сбои в работе железнодорожной автоматики. Для авроральной активности, выраженной индексом AE, и для локальной мощности геомагнитных пульсаций Pc5/Pi3 наиболее важным оказывается не мгновенное, а интегральное за 2—4 сут значение возмущенности. Аналогичный результат наблюдается и для магнитных бурь, но в этом случае в качестве параметра выступает максимальное значение модуля индекса |Dst|.

Не выявлено значимого отличия в зависимостях для выделенных программными средствами двух групп сбоев. Это может быть связано с двумя группами причин, которые условно можно отнести к техническим и физическим. К возможным техническим причинам можно отнести не адекватное задаче деление сбоев на уровне алгоритма или первичных записей. Это причина может быть устранена более подробным анализом имеющихся архивных первичных записей, выработкой рекомендаций по ведению документации на следующих этапах и соответствующей доработкой алгоритмов первичной обработки записей.

Вторая группа причин может быть связана с косвенным влиянием космической погоды на вероятность сбоя, например через метеорологические

Таблица 1. Результаты статистических тестов для выявления значимости отличий выборок, приведенных на рис. 3—5

Table 1. Results of statistical tests to identify the significance of differences in samples shown in Fig. 3—5

Индекс	t, сут	Выборка	ANOVA	H-тест	U-критерий	Тест Бруннера — Мюнцеля
Dst	1	0—1	–	–	–	–
Dst	1	0—2	–	–	–	–
Dst	1	1—2	–	–	–	–
Dst	2	0—1	–	–	–	–
Dst	2	0—2	–	+	+	+
Dst	2	1—2	–	–	–	–
Dst	4	0—1	+	+	+	+
Dst	4	0—2	+	+	+	+
Dst	4	1—2	–	–	–	–
AE	1	0—1	–	–	–	–
AE	1	0—2	+	+	+	+
AE	1	1—2	–	–	–	–
AE	2	0—1	+	+	+	+
AE	2	0—2	+	+	+	+
AE	2	1—2	–	–	–	–
AE	4	0—1	+	+	+	+
AE	4	0—2	+	+	+	+
AE	4	1—2	–	–	–	–
W _y	1	0—1	–	–	–	–
W _y	1	0—2	–	–	–	–
W _y	1	1—2	–	–	–	–
W _y	2	0—1	–	–	–	–
W _y	2	0—2	+	+	+	+
W _y	2	1—2	–	–	–	–
W _y	4	0—1	+	+	+	+
W _y	4	0—2	+	+	+	+
W _y	4	1—2	–	–	–	–

Примечание. Знаками «+» и «–» отмечено соответственно наличие или отсутствие отличий на уровне значимости 5% в сравниваемых выборках по результатам каждого из тестов.

факторы, в том числе через атмосферное электричество [22] или гелиобиологические факторы [23].

Кажется парадоксальным результат, когда на промежуточном времени $t = 2$ сут статистические тесты свидетельствуют о больших отличиях распределений геомагнитных индексов для сбоев, имеющих явную внешнюю причину (группа 2), чем сбоев, которые были априорно выделены как потенциаль-

но связанные с ГИТ (группа 1). Это может быть связано с меньшим количеством сбоев группы 1. Так как те же тесты для всех значений t не фиксируют значимых отличий между группами сбоев, эта причина представляется наиболее вероятной.

Объем доступных данных недостаточен для анализа зависимостей, не учтенных в настоящей работе, но способных повлиять на результат анализа. Он мо-

жет быть выполнен с использованием примененных в настоящей работе методов на большем объеме первичных данных. В качестве наиболее значимых факторов стоит указать наличие сезонного хода как в геомагнитной активности, так и в вероятности сбоев, а также пространственную неоднородность геомагнитных возмущений [24; 25]. Более сложным для учета является косвенное влияние космической погоды на технологические системы через метеопараметры. Исследование этих зависимостей требует привлечения больших баз данных, включающих координаты сбоев, метеоусловия, в том числе данные о молниевых разрядах, параметрах геомагнитной возмущенности и прямых измерениях ГИТ в системах электроснабжения железнодорожных магистралей.

Выводы

Выполненный статистический анализ взаимосвязи нарушений в работе железнодорожной автоматики на северном участке Октябрьской железной дороги и индексов геомагнитной активности позволил сделать следующие выводы:

- вероятность появления сбоев растет с уровнем геомагнитной активности, причем значимым оказываются интегральные за два-четыре дня значения индексов;
- группы сбоев, выделенные по указанным в описаниях причинам, не обнаруживают отличий по наличию статистической связи с исследованными индексами геомагнитной активности.

Существенно снизить риск возможных чрезвычайных происшествий на высокоширотных железных дорогах от экстремальных геомагнитных возмущений можно своевременным оперативным снабжением операторов железнодорожного транспорта прогнозами геомагнитной активности, предоставляемыми, например, Центром прогнозов геофизической обстановки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН [26]. Такое информирование позволит повысить надежность технических средств за счет использования резервных способов регулирования движения поездов и введения оперативного дежурства эксплуатационного штата.

Финансирование. Работа поддержана грантом РФФИ № 21-77-30010.

Благодарность. Авторы признательны лабораториям и организациям, участвующим в поддержании магнитометрической сети IMAGE (<https://space.fmi.fi/image/>). Индексы Dst и AE доступны на сайте Университета Кюсю, Япония (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), а база данных регионального геомагнитного индекса EI для территории Скандинавии и северо-запада России — на сайте Финского метеорологического института (https://space.fmi.fi/image/www/index.php?page=il_index).

Литература/References

1. Пилипенко В. А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. — 2021. — Т. 7, № 3. — С. 72—110. — DOI: 10.12737/szf-73202106.
2. Piliipenko V. A. Space weather impact on ground-based technological systems. *Solar-Terrestrial Physics*, 2021, vol. 7, iss. 3, pp. 68—104.
3. 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, pp. 1281—1292. DOI: 10.1029/2019SW002250.
4. 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, iss. 4, pp. 1775—1787.
5. Костроминов А. М., Ложкин Р. О. Влияние геоиндуцированных токов на дроссель-трансформаторы рельсовых цепей железнодорожной автоматики // Изв. Петербург. ун-та путей сообщения. — 2021. — Т. 18, вып. 2. — С. 222—228. — DOI: 10.20295/1815-588X-2021-2-222-228.
6. Kostrominov A. M., Lozhkin R. O. Influence of geo-induced currents on impedance bonds with secondary windings used in railway automation circuits. *Izvetiya Peterburgskogo Universiteta putey soobshcheniya*, 2021, vol. 18, iss. 2, pp. 222—228. DOI: 10.20295/1815-588X-2021-2-222-228. (In Russian).
7. Eroshenko E. A., Belov A. V., Boteler D., Gaidash S. P., Lobkov S. L., Pirjola R., Trichtchenko L. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia. *Advances in Space Research*, 2010, vol. 46, pp. 1102—1110. DOI: 10.1016/j.asr.2010.05.017.
8. Воробьев А. В., Пилипенко В. А., Сахаров Я. А., Селиванов В. Н. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов // Солнечно-земная физика. — 2019. — Т. 5, № 1. — С. 48—58. — DOI: 10.12737/szf-51201905.
9. Vorob'ev A. V., Piliipenko V. A., Sakharov Ya. A., Selivanov V. N. Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet and geomagnetically induced currents. *Solar-Terrestrial Physics*, 2019, vol. 5, iss. 1, pp. 35—42.
10. Сахаров Я. А., Кудряшова Н. В., Данилин А. Н. и др. Влияние геомагнитных возмущений на работу железнодорожной автоматики // Вестн. МИИТ. — 2009. — Вып. 21. — С. 107—111.
11. Sakharov Ya., Kudryashova N., Danilin A. et al. Influence of geomagnetic disturbances on railway automatics. *Vestnik MITE (MIIT)*, 2009, iss. 21, pp. 107—111. (In Russian).
12. 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, № 5. — С. 714—718.

- Kasinskii V. V., Lyakhov N. N., Ptitsyna N. G., Tyasto M. I., Villoresi G., Iucci N. Effect of geomagnetic disturbances on the operation of railroad automated mechanisms and telemechanics. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2007, vol. 47, iss. 5, pp. 676—680.
9. Розенберг И. Н., Гвишиани А. Д., Соловьев А. А. и др. Влияние космической погоды на надежность функционирования железнодорожного транспорта в Арктической зоне России // Железнодорожный транспорт. — 2021. — № 12. — С. 20—26.
- Rozenberg I. N., Gvoshiani A. D., Solov'ev A. A., Voronin V. A., Pilipenko V. A. Influence of space weather on stability of railway transport system in Russian Arctics. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2021, iss. 12, pp. 20—26. (In Russian).
10. Sakharov Ya., Katkalov Yu., Kudryashova N., Danilin A., Shabalin A., Pirjola R., Viljanen A. Effects of geomagnetic disturbances on Oktyabrskaya railway in Russia. Seventh European Space Weather Week 15—19 November, 2010. Brugge, Belgium, 2010. Available at: <https://www.sidc.be/esww7/program/poster1.php>.
11. Lyons L. R. A new theory for magnetospheric substorms. *J. Geophys. Res.*, 1995, vol. 100, pp. 19069—19081.
12. Apatenkov S. V., Pilipenko V. A., Gordeev E. I. et al. Auroral omega bands are a significant cause of large geomagnetically induced currents. *Geophys. Res. Lett.*, 2020, vol. 47, p. e2019GL086677. DOI: 10.1029/2019GL086677.
13. Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., Sakharov Ya., Selivanov V. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines. *J. of Space Weather and Space Climate*, 2019, vol. 9, A18. DOI: 10.1051/swsc/2019015.
14. Tanskanen E. I. A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993—2003 examined. *J. Geophys. Res.*, 2009, vol. 114, p. A05204.
15. Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Пилипенко В. А. Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 и геоиндуцированные токи // Изв. Рос. акад. наук. Сер. Физическая. — 2021. — Т. 85. — С. 445—450. — DOI: 10.31857/s0367676521030236.
- Sakharov Y. A., Yagova N. V., Pilipenko V. A. Pc5/Pi3 Geomagnetic Pulsations and Geomagnetically Induced Currents. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, 2021, vol. 85, pp. 329—333. Available at: <https://doi.org/10.3103/S1062873821030217>.
16. Ягова Н. В., Пилипенко В. А., Федоров Е. Н. и др. Геоиндуцированные токи и космическая погода: Pi3 пульсации и экстремальные значения производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля // Физика Земли. — 2018. — № 5. — С. 89—103. — DOI: 10.1134/S0002333718050137.
- Yagova N. V., Fedorov E. N., Pilipenko V. A., Lhamdondog A. D., Gusev Y. P. Geomagnetically induced currents and space weather: Pi3 pulsations and extreme values of time derivatives of geomagnetic field horizontal components. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2018, vol. 54, iss. 5, pp. 749—763.
17. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения: Вып. 2. — М.: Мир, 1972. — 287 с.
- Jenkins G., Watts D. *Spectral analysis and its applications*. San Francisco, London, Amsterdam, Holden-Day, 1969, 525 p.
18. Pilipenko V. A., Kozyreva O. V., Engebretson M. J., Soloviev A. A. ULF wave power index for the space weather and geophysical applications: A review. *Russ. J. Earth Science*, 2017, vol. 17, iss. 2, p. ES1004. DOI: 10.2205/2017ES000597.
19. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. — М.: Наука, 1980. — 512 с.
- Sheffe H. *The analysis of variance*. New York, Chapman and Hall, 1959, 477 p.
20. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. — М.: Физматлит, 2006. — 816 с.
- Kobzar A. I. *Applied mathematical statistics*. Moscow, Fizmatlit, 2006, 816 p. (In Russian).
21. Brunner E., Munzel U. The nonparametric Benhrens-Fisher problem: Asymptotic theory and a small-sample approximation. *Biometrical J.*, 2000, vol. 42, pp. 17—25. DOI: 10.1002/(SICI)1521-4036(200001).
22. Вовк В. Я., Егорова Л. В., Трошичев О. А. Связь атмосферных характеристик в Антарктиде с факторами космической погоды // Геомагнетизм и аэрномия. — 2008. — Т. 48. — С. 561—566.
- Vovk V. Ya., Egorova L. V., Troshichev O. A. Relation between the atmospheric characteristics in the antarctic regions and the space weather factors. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2008, vol. 48, iss. 4, pp. 536—541.
23. Касаткина Е. А., Шумилов О. И., Новикова Т. Б., Храмов А. В. Особенности динамики и цикличности смертности от самоубийств и гелиогеофизические и антропогенные факторы на Кольском Севере // Экология человека. — 2014. — № 2. — С. 45—50.
- Kasatkina E. A., Shumilov O. I., Novikova T. B., Khranov A. V. Features of suicide dynamics and cyclicity and heliospheric and antropogenic factors in Kola North. *Ekologiya Cheloveka*, 2014, iss. 2, pp. 45—50. (In Russian).
24. 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.
25. Yagova N. V., Pilipenko V. A., Sakharov Ya. A., Selivanov V. A. Spatial scale of geomagnetic Pc5/Pi3 pulsations as a factor of their efficiency in generation of geomagnetically induced currents. *Earth, Planets and Space*, 2021, vol. 73, p. 88. DOI: 10.1186/s40623-021-01407-2.
26. Belov A. V., Gaidash S. P., Kanonidi Kh. D., Kanonidi K. Kh., Kuznetsov V. D., Eroshenko E. A. Operative center of the geophysical prognosis in IZMIRAN. *Annales of Geophysicae*, 2005, vol. 23, no. 9, pp. 3163—3170. DOI: SRef-ID:1432-0576/ag/2005-23-3163.

Информация об авторах

Ягова Надежда Викторовна, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (123242, Россия, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1), старший научный сотрудник, Геофизический центр РАН (119296, Москва, Молодежная ул., д. 3), e-mail: nyagova@ifz.ru.

Розенберг Игорь Наумович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, проректор, Российский университет транспорта (127994, Россия, Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9), e-mail: i.rozenberg@geosc.ru.

Гвишиани Алексей Джерменович, доктор физико-математических наук, академик РАН, научный руководитель, Геофизический центр РАН (119296, Россия, Москва, Молодежная ул., д. 3), главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (123242, Россия, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1), e-mail: a.gvishiani@gcras.ru.

Сахаров Ярослав Алексеевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией геофизических наблюдений, Полярный геофизический институт (184209, Россия, Апатиты, Академгородок, д. 26а), e-mail: sakharov@pgia.ru.

Гаранин Сергей Львович, техник, Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 19), e-mail: lvovi4s@icloud.com.

Воронин Владимир Альбертович, начальник отделения, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (109029, Россия, Москва, Нижегородская ул., д. 27, стр. 1), e-mail: vlavronin@yandex.ru.

Пилипенко Вячеслав Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физики околоземного космического пространства, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (123242, Россия, Москва, Б. Грузинская ул., д. 10), главный научный сотрудник, Геофизический центр РАН (119296, Россия, Москва, Молодежная ул., д. 3), e-mail: pilipenko_va@mail.ru.

Дубчак Ирина Александровна, заместитель генерального директора, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (109029, Россия, Москва, Нижегородская ул., д. 27, стр. 1), e-mail: i.dubchak@vniias.ru.

STUDY OF GEOMAGNETIC ACTIVITY IMPACT ON FUNCTIONING OF RAILWAY AUTOMATICS IN RUSSIAN ARCTIC

Yagova, N. V.^{1,2}, Rozenberg, I. N.³, Gvishiani, A. D.^{1,2}, Sakharov, Ya. A.⁴, Garanin, S. L.⁵, Voronin, V. A.⁶, Pilipenko, V. A.^{1,2}, Dubchak, I. A.⁶

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² The Geophysical Center of RAS

³ Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

⁴ Polar Geophysical Institute (Apatity, Russian Federation)

⁵ Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS (Moscow, Russian Federation)

⁶ Research and project Institute of railway transport informatics, automatics and communication systems (Moscow, Russian Federation)

The article was received on January 6, 2023

For citing

Yagova N. V., Rozenberg I. N., Gvishiani A. D., Sakharov Ya. A., Garanin S. L., Voronin V. A., Pilipenko V. A., Dubchak I. A. Study of geomagnetic activity impact on functioning of railway automatics in Russian Arctic. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 341—352. Available at: <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-341-352>. (In Russian).

The authors study the possible influence of geomagnetic activity of railway automatics in the Russian Arctic. For the analysis they use the indices of global and regional geomagnetic activity along with the archive of failures on the Northern section of the Oktyabrskaya railway in 2001—2006. The geomagnetic activity is found to be

higher for days with failures than for days without the ones. This effect manifests itself in different types of geomagnetic disturbances, including magnetic storms, characterized by the storm index Dst, auroral activations, quantified in AE and EI indices, as well as in local index W_y indicating spectral power of geomagnetic variations in milliHerz frequency range. The maximum differences for days with and without failures are obtained for index values averaged over 2—4 days. At the same time, the researchers have found no significant differences between failures for which a cause not related to geomagnetic disturbance is a priori indicated, and those for which such a cause is not identified.

Keywords: *space weather, geomagnetic disturbances, railways.*

Funding. The study was supported by the RSCF grant No. 21-77-30010.

Acknowledgements. The authors are grateful to the laboratories and organizations involved in maintaining the IMAGE magnetometer network (<https://space.fmi.fi/image/>). The Dst and AE indices are available on the website of the University of Kyushu, Japan (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>), and the database of the regional geomagnetic index EI for the territory of Scandinavia and the northwest of the Russian Federation is available on the website of the Finnish Meteorological Institute (https://space.fmi.fi/image/www/index.php?page=il_index).

Information about the authors

Yagova, Nadezhda Viktorovna, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (10, B. Gruzinskaya str., Moscow, Russia, 123242), Senior Researcher, Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya str., Moscow, Russia, 119296), e-mail: nyagova@ifz.ru.

Rozenberg, Igor Naumovich, Doctor of Engineering, Professor, Corresponding Member of the RAS, Vice-Rector, Russian University of Transport (9, p. 9, Obratsova str., Moscow, Russia, 127994), e-mail: i.rozenberg@geosc.ru.

Gvishiani, Alexey Dzhermenovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of RAS, Chief Scientist of Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya str., Moscow, Russia, 119296), Principal Research, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (10, B. Gruzinskaya, Moscow, Russia, 123242), e-mail: a.gvishiani@gcras.ru.

Sakharov, Yaroslav Alekseevich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Head, Department of Geophysical observations, Polar Geophysical Institute (26a, Academgorodok, Apatity, Russia, 184209), e-mail: sakharov@pgia.ru.

Garanin, Sergey Lvovich, Engineer, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences (19, Kosygina str., Moscow, Russia, 119991), e-mail: lvovi4s@icloud.com.

Voronin, Vladimir Albertovich, Head of Department, Research and project Institute of railway transport informatics, automatics and communication systems (27, Bldg 1, Nizhegorodskaya str., Moscow, Russia, 109029), e-mail: vlalvoronin@yandex.ru.

Pilipenko, Vyacheslav Anatolyevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Laboratory of near-Earth Space, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (10, B. Gruzinskaya str., Moscow, Russia, Principal Researcher in the Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences (3, Molodezhnaya str., Moscow, Russia, 119296), e-mail: pilipenko_va@mail.ru.

Dubchak, Irina Alexandrovna, Deputy General Director, Research and project Institute of railway transport informatics, automatics and communication systems (Bldg 1, 27, Nizhegorodskaya str., Moscow, Russia, 109029), e-mail: i.dubchak@vniias.ru.

© Yagova N. V., Rozenberg I. N., Gvishiani A. D., Sakharov Ya. A., Garanin S. L., Voronin V. A., Pilipenko V. A., Dubchak I. A., 2023