

---

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ ПО ДАННЫМ О ЛОКАЛИЗАЦИИ И СТРУКТУРЕ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

### PROBABILISTIC ASSESSMENT OF GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENT LEVEL BASED ON AURORAL LOCALIZATION AND STRUCTURE DATA

---

**А.В. Воробьев** 

Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия, [geomagnet@list.ru](mailto:geomagnet@list.ru)  
Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия

**А.А. Соловьев** 

Геофизический центр РАН,  
Москва, Россия, [a.soloviev@gcras.ru](mailto:a.soloviev@gcras.ru)  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Россия

**Г.Р. Воробьева** 

Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия, [gulnara.vorobeva@gmail.com](mailto:gulnara.vorobeva@gmail.com)

**А.Н. Лапин**

Уфимский университет науки и технологий,  
Уфа, Россия, [meccos160@yandex.ru](mailto:meccos160@yandex.ru)

**A.V. Vorobev**

Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia, [geomagnet@list.ru](mailto:geomagnet@list.ru)  
Ufa University of Science and Technology,  
Ufa, Russia

**A.A. Soloviev**

Geophysical Center RAS,  
Moscow, Russia, [a.soloviev@gcras.ru](mailto:a.soloviev@gcras.ru)  
Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS,  
Moscow, Russia

**G.R. Vorobeva**

Ufa University of Science and Technology,  
Ufa, Russia, [gulnara.vorobeva@gmail.com](mailto:gulnara.vorobeva@gmail.com)

**A.N. Lapin**

Ufa University of Science and Technology,  
Ufa, Russia, [meccos160@yandex.ru](mailto:meccos160@yandex.ru)

---

**Аннотация.** Разработка вероятностных и статистических моделей для оперативной оценки техно-сферных рисков, возникающих вследствие воздействия космической погоды на высокоширотные энергосистемы, является актуальной задачей с выраженным прикладным характером. Наибольшую практическую значимость такие модели имеют в полярных и субполярных регионах, недостаточно обеспеченных надежными источниками геомагнитных данных.

В работе предлагается оригинальный способ безаппаратной (без использования специализированного оборудования) оценки уровня геоиндуцированных токов (ГИТ) в энергосистемах Арктической зоны РФ, заключающийся в интерпретации визуально-различимых признаков полярных сияний как естественных индикаторов состояния космической погоды. На примере рассмотренного региона в целом и подстанции 330 кВ «Выходной» магистральной электрической сети «Северный транзит» в частности показана устойчивая статистическая взаимосвязь между областью наблюдения сияний, их структурой и уровнем ГИТ в высокоширотных энергосистемах. Установлено, что в периоды наблюдения дискретных сияний с вероятностью свыше 7.5 % уровень ГИТ превышает 10 А, в то время как при сияниях диффузного типа вероятность достижения такого значения составляет всего 0.31 %.

В условиях отсутствия или дефицита данных аппаратных измерений полученные модели возможно использовать для оценки вероятности возникновения экстремальных ГИТ в заполярных энергораспределительных системах и сетях, опираясь лишь на естественные индикаторы, наблюдаемые невооруженным глазом. Практическое применение представ-

**Abstract.** Development of new probabilistic and statistical models for operational assessment of technospheric risks caused by space weather impacts on high-latitude power systems is a relevant research task with significant practical applications. Such models are of the greatest practical importance in polar and subpolar regions with insufficient availability of reliable and accurate geomagnetic data sources.

This paper presents an original approach to hardware-free (without specialized equipment) assessment of geomagnetically induced current (GIC) levels in power systems of the Russian Arctic zone by interpreting visually observable auroral features as natural indicators of space weather conditions. Using the case study of the 330 kV Vykhdnoy substation in the Severnyy Transit main power grid, a stable statistical relationship is demonstrated between the auroral observation area, auroral structure, and GIC levels in high-latitude power systems. It is established that during periods of discrete auroras the probability of GIC exceeding 10 A is over 7.5 %, whereas for diffuse auroras this probability is only 0.31 %.

In the absence or scarcity of instrumental measurement data, the developed models can be employed to estimate the likelihood of extreme GIC in Arctic power distribution systems and grids, relying solely on visual natural indicators. The practical application of the proposed models in certain scenarios may improve decision-making efficiency in situations with low situational awareness in the relevant field.

**Keywords:** geomagnetic variations, space weather, high-latitude power grids, statistical models.

ленных моделей может способствовать повышению эффективности решений, принимаемых в условиях низкой осведомленности в соответствующей предметной области.

**Ключевые слова:** геомагнитные вариации, космическая погода, высокоширотные энергосистемы, статистические модели.

## ВВЕДЕНИЕ

Наибольшие риски снижения уровня техносферной безопасности, обусловленные космической погодой, сосредоточены в пределах аврорального овала — пояса интенсивного свечения, возникающего при вторжении в атмосферу электронов из околоземного пространства. Одним из наиболее значимых проявлений космической погоды в периоды магнитных бурь и суббурь являются геоиндуцированные токи (ГИТ), возникающие в протяженных проводящих конструкциях, таких как магистральные трубопроводы, железнодорожные пути, линии электропередачи (ЛЭП) и другие объекты наземной инфраструктуры [Птицына и др., 2008; Marshall et al., 2011; Пилипенко, 2021; Соколова и др., 2019; Пилипенко и др., 2023].

В заземленных сетях во время магнитных бурь регистрировались ГИТ до 200–300 А [Pirjola et al., 2003], притом что, согласно исследованиям [Вахнина и др., 2012], тока силой даже несколько ампер достаточно для того, чтобы у трансформаторов некоторых типов сместить рабочую точку в область насыщения и спровоцировать аварийную ситуацию.

Одним из наиболее известных примеров воздействия ГИТ на техносферу являются термическое повреждение силовых трансформаторов и каскадное отключение (блэкаут) ЛЭП в провинции Квебек (Канада) во время магнитной бури 13 марта 1989 г. В результате энергосистема была обесточена более чем на 9 ч, без электроснабжения осталось около 6 млн потребителей [Kataoka, Ngwira, 2016]. Аналогичные события наблюдались в объединенной энергосистеме северо-запада России в ноябре 2001 г.: вследствие сильной магнитной бури ( $K_p=7$ ) произошло одностороннее отключение воздушной ЛЭП 330 кВ Оленегорск — Мончегорск со стороны подстанции «Оленегорск», что привело к обесточиванию потребителей суммарной мощностью свыше 73 МВт [Пуляев, Усачев, 2015; Данилов и др., 2015].

В октябре 2003 г. индуцированные геомагнитными возмущениями токи стали причиной перебоев в электроснабжении продолжительностью 20–50 мин в энергосистеме Мальме (Швеция). В это же время на начальной фазе магнитной бури регистрировались ложные срабатывания релейной защиты на подстанции «Оленегорск» [Radasky et al., 2019].

Экономические последствия подобных событий также весьма значительны. Согласно отчету Zurich Insurance Group, только в США в 2005–2015 гг. вследствие возросшей геомагнитной активности было зафиксировано 47 случаев повреждения энергооборудования. Страховые выплаты компаний при этом

составили более 1.9 млрд долларов [Dobbins, Schriiver, 2015].

Помимо вывода из рабочего состояния энергосистем, расположенных вблизи экваториальной границы аврорального овала, экстремальные ГИТ также влияют на частоту сбоев систем автоматики железнодорожной инфраструктуры в высокоширотных регионах (рис. 1). В работах [Зеленый, Петрукович, 2015; Канониди и др., 2002] отмечается, что во время сильных магнитных бурь наведенные токи систематически являются причиной синхронных аномалий (ложных срабатываний) семафорной автоматики на участках Октябрьской и Северной железных дорог [Ягова и др., 2023].

В периоды экстремальной геомагнитной активности, сопровождающейся расширением аврорального овала, указанным рискам подвержены энергосистемы, расположенные в средних и низких широтах [Marshall et al., 2011], что придает проблеме глобальный характер.

Установленные в работах [Воробьев и др., 2018; Vorobev et al., 2022] взаимосвязи между геомагнитными вариациями и уровнем ГИТ дают возможность диагностики наведенных токов при наличии соответствующих геомагнитных данных с точностью, зависящей от их качества и числа источников. Так, например, согласно [Vorobev et al., 2022], уровень ГИТ (с 15 мин временем усреднения) на подстанции 330 кВ «Выходной» (VKH) можно оценить со среднеквадратической ошибкой  $\sim 0.122 \text{ A}^2$ .

Несмотря на приемлемую точность предлагаемых моделей, неопределенными остаются границы их применимости, в которых зависимости сохраняют линейный характер. Не менее значимой проблемой является то, что предлагаемые подходы практически неприменимы для регионов, не имеющих плотного покрытия надежными источниками геомагнитных данных (п-ов Таймыр, северные районы Республики Саха (Якутия), п-ов Гыдан). Такая ситуация существенно ограничивает возможность оперативного мониторинга отклика высокоширотных энергосистем на состояние магнитосферы и изменение электротеллурического поля, поэтому полярные сияния остаются основным общедоступным индикатором состояния космической погоды.

В работе [Воробьев и др., 2024] уже рассматривалось использование естественных индикаторов состояния космической погоды для оценки ее воздействия на высокоширотные энергосистемы. Однако в данном исследовании учитывалась лишь локализация полярных сияний, импортируемая из наборов аскаплов [Ягодкина и др., 2019], и не было уделено

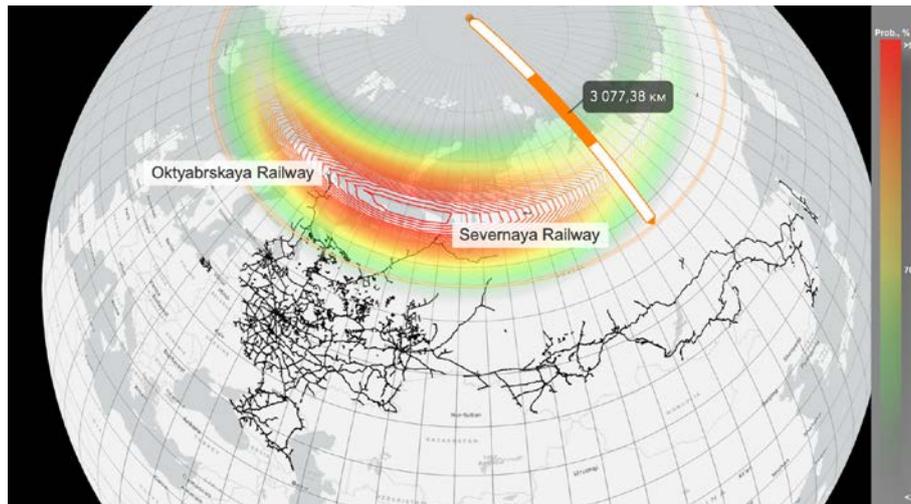


Рис. 1. Сопоставление вероятности полярных сияний с основными железнодорожными магистралями РФ во время магнитной бури с авроральным индексом  $AE=1450$  нТл. Прогноз показан на 17.02.2022, 18:30 UT по данным [Воробьев и др., 2022; <https://aurora-forecast.ru>]

достаточного внимания другим значимым признакам, например структуре сияний.

Целью данной работы является развитие предложенных ранее подходов к интерпретации естественных индикаторов состояния космической погоды за счет анализа дополнительных признаков состояния верхней ионосферы. Это будет способствовать снижению уровня неосведомленности при эксплуатации высокоширотных энергораспределительных систем в периоды их нахождения внутри границ аврорального овала.

## 1. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В качестве источника данных о полярных сияниях и их свойствах используется обсерватория «Ловозеро» (LOZ), входящая в состав Полярного геофизического института (ПГИ). Это практически единственная станция на северо-западе РФ, длительное время ведущая непрерывные наблюдения и регистрирующая полярные сияния, геомагнитные вариации и прочие геофизические эффекты высоких широт. Рассматривались данные о сияниях в окрестности обсерватории LOZ (рис. 2) за 14-летний период (с 2011 по 2024 г.), соответствующий наиболее качественным результатам синхронных наблюдений небосвода и ГИТ в регионе от ст. LOZ ( $67.97^\circ$  N,  $35.02^\circ$  E) до трансформаторной подстанции VKH ( $68.83^\circ$  N,  $33.08^\circ$  E).

С 2009 г. результаты оптических наблюдений полярных сияний публикуются ПГИ в виде квартальных наборов аскаплов, доступных по адресу [[http://pgia.ru/lang/ru/archive\\_pgi](http://pgia.ru/lang/ru/archive_pgi)]. С помощью специально разработанных алгоритмов [Воробьев и др., 2023] оригинальные аскапловы были преобразованы в электронные таблицы, удобные для машинной обработки. После синхронизации со значениями ГИТ, зарегистрированными на ст. VKH (см. рис. 2), эти таблицы можно рассматривать как обучающую выборку, включающую 92208 эпизодов 30-минутных синхронных наблюдений небосвода и ГИТ (табл. 1).

Значения ГИТ на ст. VKH, приведенные в таблице, рассчитывались по формуле из работы [Воробьев и др., 2024]:

$$J_{VKHn} = \frac{1}{N} \sum_{m=n}^{n+\Delta t_1/\Delta t_2} |J'_{VKH}|_{m'}, \quad (1)$$

где  $\Delta t_1=30$  мин — шаг дискретизации фрагментов оптических наблюдений полярных сияний (аскаплов);  $\Delta t_2=0.5$  с — шаг дискретизации данных по ГИТ;  $J_{VKH}$  — данные по ГИТ, публикуемые ПГИ;  $N=\Delta t_1/\Delta t_2$ .

Значительный массив информации о влиянии геомагнитной активности на магистральную электрическую сеть протяженностью свыше 800 км был накоплен благодаря региональной системе мониторинга токов в нейтральных трансформаторов, которая была создана в 2011 г. Кольским научным центром РАН (КНЦ РАН) совместно с ПГИ при содействии Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы [Varannik et al., 2012]. В 2022 г. была опубликована база данных измерений ГИТ в нейтральных автотрансформаторов на трех подстанциях («Выходной», «Лоухи», «Кондопога») 330 кВ магистральной электрической сети «Северный транзит» за 2011–2022 гг. [Свидетельство РФ о государственной регистрации базы данных № 2022623220 «Геоиндуцированные токи в магистральной электрической сети «Северный транзит»», <http://gic.en51.ru>; Селиванов и др., 2023].

Данные оптических наблюдений (с 2015 г.), публикуемые в открытом доступе [<http://aurora.pgia.ru:8071/?p=2>], представляют собой RGB-изображения с разрешением  $600 \times 600$  px и шагом дискретизации 10 с. Приняв во внимание как объем графической информации, так и динамику наблюдаемых явлений, мы рассматривали изображения с шагом дискретизации 10 мин. На этапе предобработки изображения масштабировались до размера  $224 \times 224$  px, что позволило сократить их объем и повысить скорость работы цифрового ассистента, участвующего в разметке данных наблюдений. После предобработки фотоданные

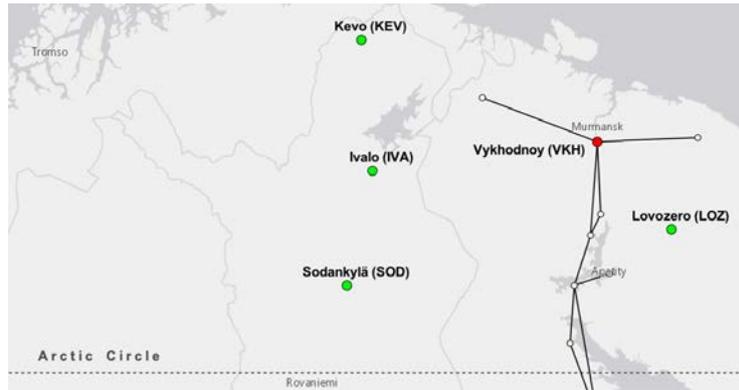


Рис. 2. География магистральной электрической сети «Северный транзит» (сплошная черная линия), включающей трансформаторную подстанцию VKH (красный кружок). Зеленые кружки соответствуют окрестным магнитным станциям, в том числе неразличимым в данном масштабе: магнитной станции «Ловозеро» (LOZ), принадлежащей Мурманскому управлению по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, и обсерватории (LOZ), входящей в состав Полярного геофизического института

Таблица 1

Фрагмент данных синхронного наблюдения полярных сияний и ГИТ

№	UTC	$J_{VKHn}$ , А	Сияния на севере	Сияния в зените	Сияния на юге
...	...	...	...	...	...
12191	14.12.2013 18:00	1.415	1	1	2
12192	14.12.2013 18:30	8.226	1	1	1
12193	14.12.2013 19:00	8.179	1	1	2
12194	14.12.2013 19:30	2.878	1	1	2
...	...	...	...	...	...

Примечание:  $J_{VKHn}$  — значение ГИТ, рассчитываемое по формуле (1); 0 — сияния отсутствуют; 1 — сияния присутствуют; 2 — облачность [Воробьев и др., 2024]

Таблица 2

Соотношение встречаемости изображений разных классов, зарегистрированных камерой обсерватории LOZ

Встречаемость	Класс						
	Чистое небо	Дискретное сияние	Дуга	Диффузное сияние	Сияние за горизонтом	Сияние и облачно	Дефектные изображения
$N$	51 278	1201	3078	2806	5908	24 560	4159
$P$ , %	55.1	1.3	3.3	3.0	6.4	26.4	4.5

небосвода с 04.12.2015 по 27.04.2024 представляют собой 163899 последовательно зарегистрированных неповторяющихся изображений общим объемом ~8 Гб.

Авторами были обработаны и приведены в соответствие с представленной ниже классификацией 92987 изображений небосвода за рассматриваемый период. Соотношение между количеством элементов каждого класса приведены в табл. 2.

1. Чистое небо / сияния отсутствуют — изображение, на котором сияния однозначно не наблюдаются.

2. Дискретное сияние — изображение, на котором полярное сияние с прерывистой структурой имеет форму спирали или вихря с яркостью, превышающей яркость фоновых звезд.

3. Дуговое сияние (дуга) — изображение, на котором присутствуют одна или две выраженные горизонтальные дуги сияния.

4. Диффузное сияние — изображение, на котором видны крупные участки сияний с размытыми краями. Яркость сияний сопоставима или меньше яркости фоновых звезд.

5. Сияние за горизонтом — изображение, на котором большая часть сияния расположена вблизи или за горизонтом, из-за чего определить структуру сияния затруднительно.

6. Сияние и облачно — изображение, на котором в условиях облачности наблюдается свечение, указывающее на потенциальное наличие полярного сияния, однако однозначно отнести его к одному из классов не представляется возможным.

7. Дефектное изображение — изображение, на котором присутствует сильный шум и/или иные артефакты.

При наличии на одном снимке сияний нескольких типов идентификация осуществлялась на основании усредненного значения яркости изображения: сначала дискретные, затем дуговые и в последнюю очередь диффузные. Исключением являлись снимки сияний вблизи горизонта, форма которых напоминает дугу. В таких случаях событие классифицировалось как сияние за горизонтом. Если же идентификация была невозможна, изображение игнорировалось.

## 2. КОРРЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ГИТ И ОБЛАСТЬЮ НАБЛЮДЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Как было показано в работе [Воробьев и др., 2024], распределение значений  $J_{\text{ВКН}}$  при одновременном наблюдении сияний в различных областях небосвода соответствует логнормальному закону [Eckhard et al., 2001; Wintoft et al., 2015]. Это подтверждается тестом Колмогорова—Смирнова [Dimitrova et al., 2020], согласуется с полученными ранее результатами [Воробьев и др., 2019; Воробьев, Пилипенко, 2021; Vorobev et al., 2022], а также не противоречит исследованиям, проводимым ПГИ [Воробьев и др., 2018], Институтом физики Земли им. О.Ю. Шмидта (ИФЗ РАН) [Pilipenko et al., 2024] и другими организациями [Tanskanen, 2009].

Ранее было определено, что наиболее вероятный уровень  $J_{\text{ВКН}}$  при сияниях на севере, в зените и на юге составляет 0.08, 0.23 и 0.68 А соответственно (рис. 3, 4), что объясняется расширением аврорального овала в периоды сильной геомагнитной активности. Это дает основание рассматривать вероятный уровень токов, индуцированных в высокоширотных ЛЭП в зависимости от области проявления сияний в оптическом диапазоне [Воробьев и др., 2024]. В работе [Воробьев и др., 2024] указывалось, что вероятность превышения в энергосистеме уровня ГИТ (усредненного за 30 мин) 2 А при сияниях на севере составляет 6 %, а при сияниях в зените и на юге — 10 % и 15 % соответственно (см. рис. 4, б). Вероятность того, что  $J_{\text{ВКН}}$  превысит 10 А, в период сияний на юге составляет 0.15 % против 0.06 % и 0.04 % при сияниях в зените и на севере соответственно.

Было установлено также, что в периоды отсутствия сияний на высоких широтах или при слабых диффузных сияниях статистические характеристики ГИТ демонстрируют максимальные асимметрию и эксцесс (см. рис. 3, 4). Это свидетельствует о преимущественной концентрации значений  $J_{\text{ВКН}}$  в нижнем диапазоне и минимальном уровне неопределенности (см. рис. 4, а). Можно предположить, что экстремальные ГИТ практически всегда сопутствуют полярным сияниям. При этом наличие сияний не является достаточным условием для возникновения экстремальных ГИТ, что указывает на сложную взаимосвязь между этими явлениями.

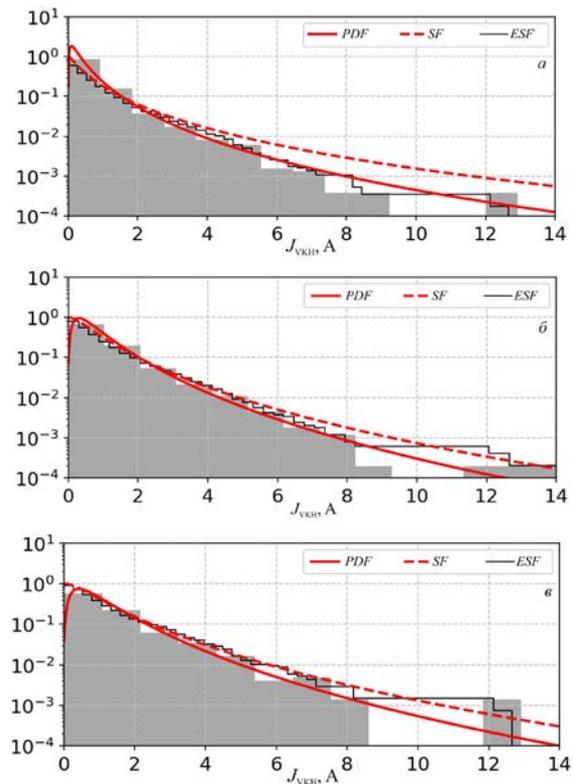


Рис. 3. Статистика ГИТ при наблюдении сияний на севере (а), в зените (б) и на юге (в): красные сплошная и штриховая линии — функции плотности вероятности (PDF) и выживаемости (SF) соответственно логнормального закона распределения; черная сплошная линия — эмпирическая функция выживаемости (ESF) [Воробьев и др., 2024]

## 3. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ГИТ И СТРУКТУРОЙ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

При сравнительном анализе уровней ГИТ со структурой полярных сияний мы использовали четыре наилучшим образом классифицируемых состояния небосвода: сияния отсутствуют, диффузные, дуговые и дискретные сияния. Характер распределения усредненных по 10-минутным интервалам значений  $J_{\text{ВКН}}$ , соответствующий одному из состояний небосвода, представлен на рис. 5. Все гистограммы, как и ранее, наиболее приближены к логнормальному распределению. Толщина хвоста распределения монотонно возрастает от рис. 5, а к рис. 5, в и при статистическом разделении значений  $J_{\text{ВКН}}$  по группам может являться признаком структуры наблюдаемых сияний.

В табл. 3 представлены некоторые статистические характеристики значений ГИТ, регистрируемых синхронно с наблюдением одного из рассматриваемых здесь состояний небосвода. Из таблицы следует, что в периоды дискретных сияний уровень ГИТ с вероятностью 50 % превышает 2.58 А. С той же вероятностью во время сияний типа «дуга» ГИТ преодолевают порог 0.98 А. В периоды диффузных сияний или в отсутствие сияний как таковых уровень ГИТ с вероятностью 50 % не превышает 0.72 и 0.41 А соответственно.

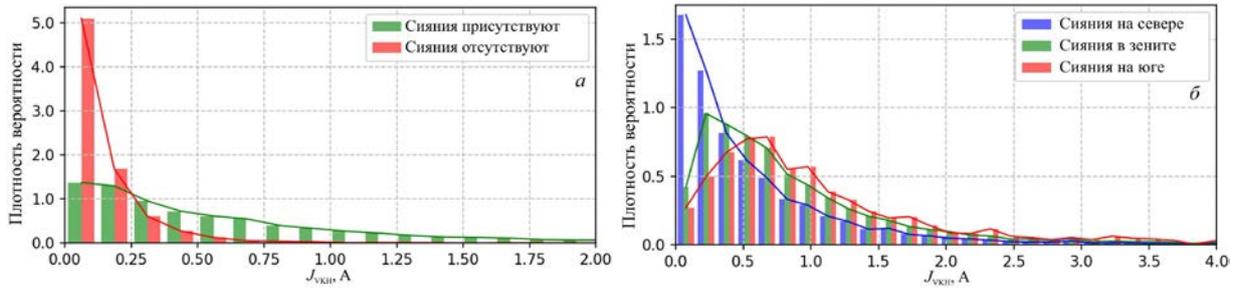


Рис. 4. Гистограммы распределений плотности вероятности значений ГИТ при наличии/отсутствии полярных сияний (а) и при их дифференциации по областям небосвода (б). Ширина интервалов гистограммы в данном случае определяется согласно правилу  $h_n = 3.49sn^{-1/3}$ , где  $n$  — размер выборки,  $s$  — среднее квадратическое отклонение [Scott, 1979], и соответствует  $\sim 0.15$  А [Воробьев и др., 2024]

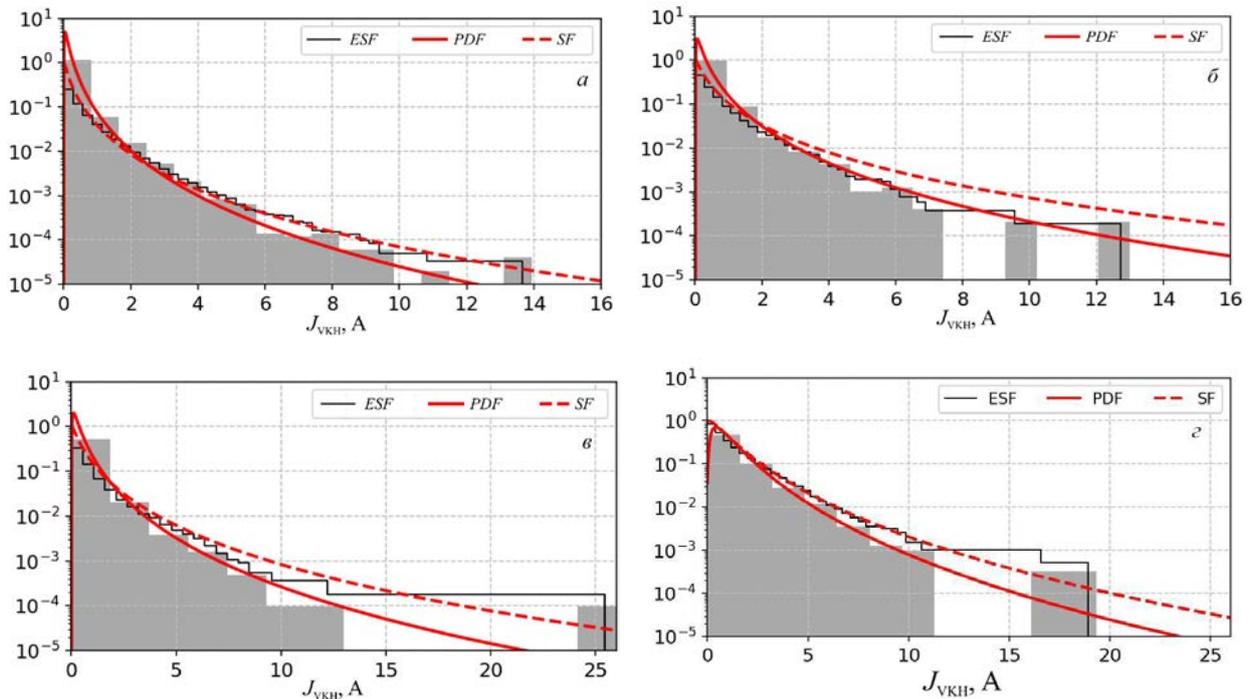


Рис. 5. Распределения значений  $J_{VKH}$  (усредненных по 10 мин) в периоды отсутствия сияний (а) и во время диффузных (б), дуговых (в) и дискретных (г) сияний. Обозначения те же, что и на рис. 3

Таблица 3

Оценочные значения ГИТ при различных состояниях верхней ионосферы

Характеристика \ Состояние	Среднее значение, А	Средний максимум в импульсе, А	Порог, преодолеваемый с вероятностью 50 %, А	Вероятность преодоления порога 10 А, %
Сияния отсутствуют	0.28	0.84	0.41	0.17
Диффузное сияние	0.45	1.30	0.72	0.31
Дуговое сияние	0.59	1.79	0.98	1.70
Дискретное сияние	1.29	4.05	2.58	7.56

Заметим, что для диффузных сияний характерны минимальное среднее квадратическое отклонение  $J_{VKH}$  и наивысший межквартильный размах IQR (табл. 4), что свидетельствует о сдвиге максимума распределения в область малых значений ГИТ. Другими словами, в периоды наблюдения диффузных сияний вероятность возникновения экстремальных ГИТ, способных спровоцировать серьезные последствия, крайне мала.

Ситуация с отсутствием сияний менее однозначна, поскольку в процессе разметки данных камеры всего неба [Sigernes et al., 2014] сияния могут просто не попасть в объектив фоторегистратора. Данную проблему можно решить, увеличив плотность покрытия небосвода фоторегистраторами. Заметим, что эта проблема не актуальна при практическом применении предложенного нами подхода, т. е. при визуальной оценке состояния небосвода.

Таблица 4

Статистические характеристики выборок значений ГИТ при сияниях различных типов

Характеристика	Стандартное отклонение, А	Межквартильный размах, А
Состояние		
Диффузное сияние	1.93	1.17
Дуговое сияние	2.91	1.55
Дискретное сияние	4.57	3.35

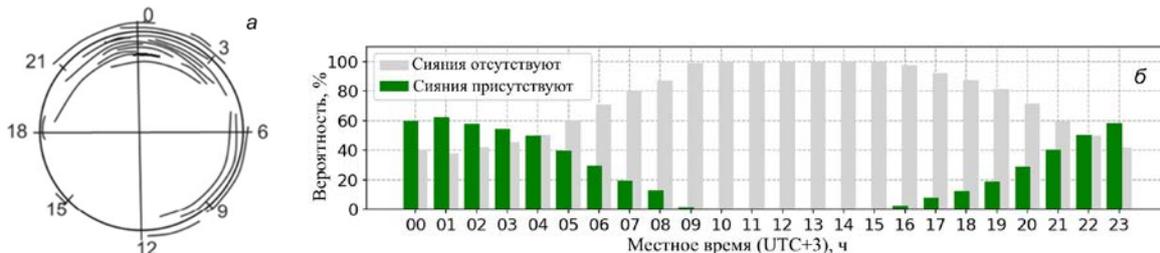


Рис. 6. Возможность диагностирования вероятности сбоев систем автоматики высокоширотных железных дорог на основе естественных индикаторов состояния космической погоды: *а* — распределение аномалий работы сигнализации на Северной железной дороге относительно местного времени в периоды сильных магнитных бурь в 1989 г. и 2000–2005 гг. [Eroshenko et al., 2010]; *б* — суточные вариации вероятности наблюдения сияний в окрестности ст. LOZ

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На примере рассматриваемого региона показана статистическая взаимосвязь между областью наблюдения сияний, их структурой и ГИТ в высокоширотных энергосистемах. Данную взаимосвязь можно использовать для оценки вероятного уровня ГИТ в полярных энергораспределительных системах и сетях. Установлено, что в периоды наблюдения дискретных сияний уровень ГИТ превышает 10 А с вероятностью 7.5 %, тогда как во время диффузных сияний вероятность достижения аналогичного уровня в 24 раза ниже.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на интеграцию распределений значений ГИТ в зависимости от структуры и локализации сияний в единую корреляционно-статистическую модель. Для объяснения взаимосвязи ГИТ и структуры полярных сияний также требуются дополнительные исследования. Кроме того, целесообразным представляется расширение системы классификации сияний в контексте рассматриваемой предметной области.

Поскольку использовались преимущественно статистические методы, некоторые полученные в работе числовые значения являются оценочными и могут варьировать в случае иных исходных данных, однако можно ожидать, что качественные соотношения между ними сохранятся.

Бесспорно, предложенный нами подход уступает в точности классическим методам, использующим спутниковые и наземные инструментальные данные о состоянии магнитосферы Земли, однако его преимуществом является независимость от аппаратного обеспечения и систем связи.

Необходимо отметить также, что для достижения качественно нового уровня техносферной безопасности рассматриваемых объектов высокоширотной инфраструктуры требуется развитие собственных сетей наблюдений.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вследствие высокой вероятности возникновения экстремальных геомагнитных возмущений у границ аврорального овала существует реальная угроза снижения уровня техносферной безопасности. Системы поддержки принятия решений и мониторинга, призванные оперативно диагностировать и прогнозировать реакцию технологических объектов на вариации космической погоды, пока что не всегда эффективны. Например, в России фактически единственная система измерения ГИТ принадлежит Полярному геофизическому институту и Центру энергетики Севера, которые с 2010 г. осуществляют мониторинг ГИТ в сетях Колэнерго, предоставляя специалистам возможность исследовать данный феномен на Кольском п-ове [Гвоздарев и др., 2024].

На остальной территории Российской Арктики единственным повсеместно доступным индикатором состояния космической погоды остаются полярные сияния. Научно обоснованная интерпретация полярных сияний может помочь в оценке вероятности сбоев в высокоширотных навигационных и энергораспределительных системах, системах связи, а также на объектах железнодорожной инфраструктуры, поскольку суточный ход возникновения сбоев систем автоматики коррелирует с суточным ходом вероятности наблюдения сияний.

На рис. 6 показаны распределения аномалий в работе систем автоматики Северной железной дороги (*а*) и вероятности наблюдения сияний в окрестности станции LOZ (*б*) в зависимости от местного времени. Оба распределения демонстрируют выраженный максимум вблизи полуночи, что согласуется с известным суточным ходом геомагнитной активности и частоты суббурь. Заметим, что совпадение максимумов не является прямым доказательством причинно-следственной связи. Скорее, оба процесса обусловлены общим фактором — крупномасштабными ва-

риациями магнитного поля во время суббурь, которые вызывают интенсивные полярные сияния и генерируют ГИТ.

Кроме того, как следует из рис. 6, а, распределение сбоев имеет вторичный максимум в утренние часы, вероятно связанный с интенсивными Pс5-пульсациями, а не с авроральной активностью, поскольку в этот период сияния наблюдаются реже (см. рис. 6, б). Этот эффект требует дополнительного изучения.

В работе [Воробьев и др., 2024] было показано, что ГИТ зависят от области проявления сияний, а апостериорная вероятность превышения ими некоторого значения может быть аппроксимирована выражением (2):

$$P(A|B) \approx P(J_0) = a \exp(bJ_0) + c, \quad (2)$$

где  $P(A|B)$  — вероятность того, что при наблюдении сияний в заданной области  $J_{\text{ВКН}} \geq J_0$ , где  $J_0 = \text{const}$  — некоторое заданное значение ГИТ;  $a = 102.87$  для случаев отсутствия сияний,  $a = 102.68, 104.69, 103.60$  для случаев наблюдения сияний на севере в зените и на юге соответственно; аналогично  $b = -4.34, -1.69, -1.21, -0.95$  и  $c = 0.04, 0.68, 0.53, 0.62$  для случаев отсутствия сияний и их наблюдения на севере, в зените и на юге соответственно. При этом границы применимости формулы (2) в представленном виде требуют уточнения, прежде всего в области больших значений токов ( $J_0 > 10$  А), которые не рассматривались в работе [Воробьев и др., 2024].

Развитие данного направления исследований позволило выявить также статистические взаимосвязи между ГИТ и структурой полярных сияний. Было показано, что в периоды диффузных сияний и в отсутствие сияний ГИТ с вероятностью 50 % не превышает 0.72 и 0.41 А соответственно. Во время дуговых сияний  $J_{\text{ВКН}}$  с вероятностью 50 % преодолевает порог 0.98 А. При дискретных сияниях с той же вероятностью  $J_{\text{ВКН}} > 2.58$  А.

Сформулировано и обосновано предположение, что в периоды наблюдения диффузных сияний и отсутствия сияний вероятность возникновения экстремальных значений ГИТ, способных спровоцировать серьезные последствия, крайне мала. Выдвинута гипотеза о том, что ГИТ связаны с локализацией (север, зенит или юг) и структурой (диффузные, дискретные или дуга) сияний, наблюдаемых в окрестности высокоширотных ЛЭП.

Подобный подход может использоваться при оценке как вероятности сбоев систем автоматики высокоширотных железных дорог, так и дополнительной погрешности спутниковых систем навигации и магнитных инклинометров, применяемых при наклонно-направленном бурении нефтегазовых скважин в Арктической зоне РФ [Гвишиани, Лукьянова, 2017; Soloviev et al., 2022]. Естественным ограничением применимости данного подхода является то, что наблюдение сияний на ночном небосводе на высоких широтах возможно лишь семь месяцев в год при условии благоприятной метеорологической обстановки.

Авторы выражают благодарность Полярному геофизическому институту (ПГИ) за предоставленные

данные о наблюдении полярных сияний обсерваторией «Ловозеро», а также ПГИ и Центру физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, за данные по ГИТ, регистрируемым на станции ВКН. Авторы благодарят также рецензентов за замечания и предложения, позволившие существенно улучшить работу.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-30010-П).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вахнина В.В., Черненко А.Н., Кузнецов В.А. Влияние геоиндуцированных токов на насыщение магнитной системы силовых трансформаторов. *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2012, № 3(21), с. 65–69.
- Воробьев А.В., Пилипенко В.А. Подход к восстановлению геомагнитных данных на базе концепции цифровых двойников. *Солнечно-земная физика*. 2021, т. 7, № 2, с. 53–62. DOI: [10.12737/szf-72202105](https://doi.org/10.12737/szf-72202105) / Vorobev A.V., Pilipenko V.A. Geomagnetic data recovery approach based on the concept of digital twins. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, iss. 2, pp. 48–56. DOI: [10.12737/stp-72202105](https://doi.org/10.12737/stp-72202105).
- Воробьев В.Г., Сахаров Я.А., Ягодкина О.И. и др. Геоиндуцированные токи и их связь с положением западной электроструи и границами авроральных высыпаний. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018, т. 5, вып. 4, с. 16–28.
- 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](https://doi.org/10.12737/szf-51201905) / Vorobev A.V., Pilipenko V.A., Sakharov Ya.A., Selivanov V.N. Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet, and geomagnetically induced currents. *Sol.-Terr. Phys.* 2019, vol. 5, iss. 1, pp. 35–42. DOI: [10.12737/stp-51201905](https://doi.org/10.12737/stp-51201905).
- Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Воробьева Г.Р. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний. *Солнечно-земная физика*. 2022, т. 8, № 2, с. 93–100. DOI: [10.12737/szf-82202213](https://doi.org/10.12737/szf-82202213) / Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeveva G.R. Interactive computer model for aurora forecast and analysis. *Sol.-Terr. Phys.* 2022, vol. 7, iss. 2, pp. 84–90. DOI: [10.12737/stp-82202213](https://doi.org/10.12737/stp-82202213).
- Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А. и др. Локальная диагностика наличия полярных сияний на основе интеллектуального анализа геомагнитных данных. *Солнечно-земная физика*. 2023, т. 9, № 2, с. 26–34. DOI: [10.12737/szf-92202303](https://doi.org/10.12737/szf-92202303) / Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., et al. Local diagnostics of aurora presence based on intelligent analysis of geomagnetic data. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 2, pp. 22–30. DOI: [10.12737/stp-92202303](https://doi.org/10.12737/stp-92202303).
- Воробьев А.В., Лапин А.Н., Соловьев А.А., Воробьева Г.Р. Подход к интерпретации естественных индикаторов состояния космической погоды для оценки эффектов ее воздействия на высокоширотные энергосистемы. *Физика Земли*. 2024, № 4, с. 100–110. DOI: [10.31857/S0002333724040071](https://doi.org/10.31857/S0002333724040071).
- Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Оценка влияния геомагнитных возмущений на траекторию наклонно-направленного бурения глубоких скважин в Арктическом регионе. *Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности. Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 30-летию ИПНГ РАН*. 2017, с. 46.

- Гвоздарев А.Ю., Сивоконь В. П., Хомутов С.Ю. Оценка величины геомагнитно-индуцированных токов в Центральном энергорайоне энергосистемы Камчатского края. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2024, т. 49, № 4, с. 185–202. DOI: [10.26117/2079-6641-2024-49-4-185-202](https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-49-4-185-202).
- Данилов Г.А., Денчик Ю.М., Иванов М.Н., Ситников Г.В. *Повышение качества функционирования линий электропередачи.* М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. 558 с.
- Зеленый Л.М., Петрукович А.А. Арктика. Космическая погода. *Природа.* 2015, № 9, с. 31–39.
- Каноники Х.Д., Ораевский В.Н., Белов А.В. и др. Сбои в работе железнодорожной автоматики во время геомагнитных бурь. *Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций: сборник материалов научно-практической конференции.* 2002, с. 41–42.
- 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](https://doi.org/10.12737/szf-73202106) / Pilipenko A.V. Space weather impact on ground-based technological systems. *Sol.-Terr. Phys.* 2021, vol. 7, iss. 3, pp. 68–104. DOI: [10.12737/stp-73202106](https://doi.org/10.12737/stp-73202106).
- Пилипенко В.А., Черников А.А., Соловьев А.А. и др. Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах. *Russ. J. Earth Sci.* 2023, т. 23, ES2008. DOI: [10.2205/2023ES000824](https://doi.org/10.2205/2023ES000824).
- Птицына Н.Г., Тясто М.И., Касинский В.В., Ляхов Н.Н. Влияние космической погоды на технические системы: сбои железнодорожной аппаратуры во время геомагнитных бурь. *Солнечно-земная физика.* 2008, вып. 12(125), т. 2, с. 360.
- Пуляев В.И., Усачев Ю.В. Магнитная буря — причина отключения ВЛ 330 кВ. *Энергетик.* 2002, № 7, с. 18–20.
- Селиванов В.Н., Аксенович Т.В., Билин В.А. и др. База данных геоиндуцированных токов в магистральной электрической сети «Северный транзит». *Солнечно-земная физика.* 2023, т. 9, № 3, с. 100–110. DOI: [10.12737/szf-93202311](https://doi.org/10.12737/szf-93202311) / Selivanov V.N., Aksenovich T.V., Bilin V.A., et al. Database of geomagnetically induced currents in the main transmission line “Northern Transit”. *Sol.-Terr. Phys.* 2023, vol. 9, iss. 3, pp. 93–101. DOI: [10.12737/stp-93202311](https://doi.org/10.12737/stp-93202311).
- Соколова О.Н., Сахаров Я.А., Грицутенко С.С., Коровкин Н.В. Алгоритм анализа устойчивости энергосистем к геомагнитным бурям. *Известия РАН. Энергетика.* 2019, с. 33–52. DOI: [10.1134/S0002331019050145](https://doi.org/10.1134/S0002331019050145).
- 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](https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-341-352).
- Ягодкина О.И., Воробьев В.Г., Шекунова Е.С. Наблюдения полярных сияний над Кольским полуостровом. *Труды Кольского научного центра РАН.* 2019, т. 10, № 8-5, с. 43–55. DOI: [10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8).
- Barannik M.B., Danilin A.N., Kat'kalov Yu.V., et al. A system for recording geomagnetically induced currents in neutrals of power autotransformers. *Instruments and Experimental Techniques.* 2012, vol. 55, no. 1, pp. 110–115. DOI: [10.1134/S0020441211060121](https://doi.org/10.1134/S0020441211060121).
- Dimitrova D.S., Kaishev V.K., Tan S. Computing the Kolmogorov–Smirnov distribution when the underlying CDF is purely discrete, mixed, or continuous. *J. Statistical Software.* 2020, vol. 95, iss. 10, pp. 1–42. DOI: [10.18637/jss.v095.i10](https://doi.org/10.18637/jss.v095.i10).
- Dobbins R.W., Schriiver K. *Electrical Claims and Space Weather. Measuring the Visible Effects of an Invisible Force June 2015.* URL: <https://centerforsecuritypolicy.org/wp-content/uploads/2022/06/Appendix-F-2015Zurich-ElectricalClaimsandSpaceWeather.pdf> (дата обращения 3 мая 2025 г.).
- Eckhard L., Werner A.S., Markus A. Log-normal distributions across the sciences: keys and clues: on the charms of statistics, and how mechanical models resembling gambling machines offer a link to a handy way to characterize log-normal distributions, which can provide deeper insight into variability and probability — normal or log-normal: That is the question. *BioScience.* 2001, vol. 51, no. 5, pp. 341–352. DOI: [10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0341:LNDATS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0341:LNDATS]2.0.CO;2).
- 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, iss. 9, pp. 1102–1110. DOI: [10.1016/j.asr.2010.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.017).
- Kataoka R., Ngwira C. Extreme geomagnetically induced currents. *Prog. in Earth and Planet. Sci.* 2016, no. 3, p. 23.
- Marshall R.A., Smith E.A., Francis M.J., et al. A preliminary risk assessment of the Australian region power network to space weather. *Space Weather.* 2011, vol. 9, S10004. DOI: [10.1029/2011SW000685](https://doi.org/10.1029/2011SW000685).
- Pilipenko V.A., Kozyreva O.V., Belakhovsky V.B., et al. What should we know to predict geomagnetically induced currents in power transmission lines. *Russ. J. Earth Sci.* 2024, vol. 24, ES6006. DOI: [10.2205/2024es000954](https://doi.org/10.2205/2024es000954).
- Pirjola R., Pulkkinen A., Viljanen A. Studies of space weather effects on the Finnish natural gas pipeline and on the Finnish high-voltage power system. *Adv. Space Res.* 2003, vol. 31, iss. 4, pp. 795–805. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00781-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00781-0).
- Radasky W., Emin Z., Adams R, van Baelen J. CIGRE TB 780: *Understanding of geomagnetic storm environment for high voltage power grids.* Technical report. 2019.
- Scott D.W. On optimal and data-based histograms. *Biometrika.* 1979, vol. 66, pp. 605–610. DOI: [10.1093/biomet/66.3.605](https://doi.org/10.1093/biomet/66.3.605).
- Sigernes F., Holmen S.E., Biles D., et al. Auroral all-sky camera calibration. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 2014, no. 3, pp. 241–245. DOI: [10.5194/gi-3-241-2014](https://doi.org/10.5194/gi-3-241-2014).
- Soloviev A.A., Sidorov R.V., Oshchenko A.A., Zaitcev A.N. On the need for accurate monitoring of the geomagnetic field during directional drilling in the Russian Arctic. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2022, vol. 58, pp. 420–434. DOI: [10.1134/S1069351322020124](https://doi.org/10.1134/S1069351322020124).
- 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, A05204. DOI: [10.1029/2008JA013682](https://doi.org/10.1029/2008JA013682).
- Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., et al. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data. *App. Sci.* 2022, vol. 12, 1522. DOI: [10.3390/app12031522](https://doi.org/10.3390/app12031522).
- Wintoft P., Wik M., Viljanen A. Solar wind driven empirical forecast models of the time derivative of the ground magnetic field. *J. Space Weather Space Climate.* 2015, vol. 5, A7. DOI: [10.1051/swsc/2015008](https://doi.org/10.1051/swsc/2015008).
- URL: <https://aurora-forecast.ru> (дата обращения 3 мая 2025 г.).
- URL: [http://pgia.ru/lang/ru/archive\\_pgi](http://pgia.ru/lang/ru/archive_pgi) (дата обращения 3 мая 2025 г.).
- URL: <http://gic.en51.ru> (дата обращения 3 мая 2025 г.).
- URL: <http://aurora.pgia.ru:8071/?p=2> (дата обращения 3 мая 2025 г.).
- Как цитировать эту статью:*  
Воробьев А.В., Соловьев А.А., Воробьева Г.Р., Лапин А.Н. Вероятностная оценка уровня геоиндуцированных токов по данным о локализации и структуре полярных сияний. *Солнечно-земная физика.* 2026, т. 12, № 1, с. 125–133. <https://doi.org/10.12737/szf-121202613>.