

## ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ИНДИКАТОРОВ СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТОВ ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫСОКОШИРОТНЫЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

© 2024 г. А. В. Воробьев<sup>1,2,\*</sup>, А. Н. Лапин<sup>2</sup>, А. А. Соловьев<sup>1,3</sup>, Г. Р. Воробьева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий, г. Уфа, Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

\*E-mail: geomagnet@list.ru

Поступила в редакцию 14.02.2024 г.

После доработки 04.03.2024 г.

Принята к публикации 05.03.2024 г.

Динамичное освоение и развитие Арктической зоны РФ неразрывно связано с необходимостью минимизации техносферных рисков, сопряженных в том числе и с эффектами воздействия космической погоды на системы энергетического оборудования, эксплуатируемые внутри границ аврорального овала. При этом сопутствующий мониторинг параметров космической погоды и вариаций геомагнитного поля в Арктике осуществляется лишь посредством небольшой группы спутников и нескольких десятков магнитных станций, расположенных главным образом на территории США, Канады, северной и центральной Европы. Очевидно, что сложившаяся ситуация практически исключает возможность оперативного диагностирования уровня геоиндуцированных токов (ГИТ) для большей части Арктической зоны РФ, где фактически единственным доступным индикатором состояния космической погоды остаются полярные сияния.

В работе предлагается подход к интерпретации проявления сияний для оценки эффектов воздействия космической погоды на объекты и системы высокоширотной инфраструктуры. Так, на примере подстанции “Выходной” магистральной электрической сети “Северный транзит” показано, что при регистрации полярных сияний на севере, в зените и на юге наиболее вероятный (усредненный по 30 мин) уровень ГИТ составляет 0.08, 0.23 и 0.68 А соответственно. При этом вероятность того, что среднеполучасовой уровень ГИТ превысит 2 А (в случае сияний на севере, в зените и на юге) составляет ~6, ~10 и ~15 % соответственно. В заключение рассматриваются пути модернизации и границы применимости предложенного подхода.

*Ключевые слова:* геоиндуцированные токи, полярные сияния, геомагнитные вариации, космическая погода, высокоширотная инфраструктура, статистический анализ.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724040071>, EDN: FWPOQI

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, наивысшие риски снижения уровня техносферной безопасности, связанные с эффектами воздействия космической погоды на объекты высокоширотной инфраструктуры (сбои систем коротковолновой радиосвязи и железнодорожной автоматики, возникновение дополнительных погрешностей магнитных инклинометров, отказы систем энергетического оборудования, снижение долговечности магистральных трубопроводов вследствие увеличения скорости их коррозии и пр. [Соколова и др., 2019; Птицына и др., 2008; Vorobev et al., 2022; Гвишиани и др., 2017; Soloviev et al., 2022;

Пилипенко, 2021]), определяются в области аврорального овала – пояса интенсивной светимости, создаваемой вторжением в атмосферу электронов из околоземного пространства.

Так, например, магнитная буря 13.03.1989 г. явилась причиной выхода из строя силовых трансформаторов и каскадного отключения (блэкаута) линий электропередачи (ЛЭП) более чем на 9 часов в провинции Квебек (Канада) [Kataoka, Ngwira, 2016]. В объединенной энергосистеме северо-запада России в ноябре 2001 г. вследствие геомагнитной активности (ГМА) дважды имело место одностороннее отключение воздушной ЛЭП (330 кВ)

Оленегорск–Мончегорск со стороны подстанции “Оленегорск”, в результате чего были отключены потребители суммарной мощностью более 70 МВт [Пуляев, 2015; Данилов, 2015]. В октябре 2003 г. аналогичная причина привела к перерыву электроснабжения на 20–50 мин в энергосистеме в Мальме на юге Швеции, а также к “ложному срабатыванию” реле на подстанции “Оленегорск” в самом начале магнитной бури [Radasky et al., 2019]. Из отчета “Zurich Insurance Group” следует, что только в США в результате сбоев электрооборудования в периоды магнитных бурь с 2005 по 2015 гг. страховые выплаты превысили \$ 1.9 млрд [Dobbins, Schriiver, 2015]. В работах [Зеленый, Петрукович, 2015; Канониди и др., 2002; Pilipenko et al., 2023] отмечается, что токовые наводки практически после каждой сильной магнитной бури являются причиной синхронных аномалий в работах сигнальной автоматики северных веток Октябрьской и Северной железных дорог.

Усугубляет проблему и то, что в периоды экстремальной ГМА вследствие смещения аврорального овала в область более низких широт указанные риски становятся актуальными и для энергосистем, эксплуатируемых на средних широтах.

Установленные в работах [Воробьев и др., 2019; Vorobev et al., 2022] взаимосвязи между геомагнитными вариациями (ГМВ) и уровнем ГИТ позволяют осуществлять диагностирование токовых наводок при наличии соответствующих источников геомагнитных данных и с зависящим от их параметров и числа качеством. Так, например, согласно работе [Vorobev et al., 2022] усредненный по 15 мин уровень ГИТ на станции “Vukhodnoy” (VKH) можно оценить из выражения (1) со среднеквадратической ошибкой  $\sim 0.122 \text{ A}^2$ :

$$|J_{\text{VKH}}| = \beta_0 + \beta_1 \left| \frac{dY_{\text{LOZ}}}{dt} \right| + \beta_2 \left| \frac{dY_{\text{IVA}}}{dt} \right| + \beta_3 \left| \frac{dY_{\text{KEV}}}{dt} \right| + \beta_4 \text{IE}, \quad (1)$$

где:  $dY_{\text{LOZ}}/dt$ ,  $dY_{\text{IVA}}/dt$ ,  $dY_{\text{KEV}}/dt$  – переменность восточной составляющей ГМВ, регистрируемых станциями Lovozero (LOZ), Ivalo (IVA) и Kevo (KEV) соответственно; IE – значение IE-индекса;  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_4$  – регрессионные коэффициенты.

Несмотря на неплохую расчетную точность данного метода, остаются не вполне ясными границы его применимости, в рамках которых представленная зависимость сохраняет

линейный характер. Кроме этого, подход практически малоприменим для регионов, не имеющих плотного покрытия надежными источниками геомагнитных данных, например, п-ов Таймыр, Гыданский п-ов, северные районы Республики Саха (Якутия) и пр.

Наряду с этим определенное представление об актуальном уровне ГИТ возможно получить, опираясь и на спутниковые данные о параметрах солнечного ветра, регистрируемых аппаратами ACE и DSCOVR на квазипериодических орбитах Лиссажу вблизи первой точки Лагранжа (L1) [Wintoft et al., 2015]. Однако в силу разных причин (например, отсутствия спутниковых данных, стабильного Интернет-соединения и др.) эффективность такого подхода при всех его потенциальных преимуществах может оказаться ниже ожидаемой.

Резюмируя, можно заключить, что существующий мониторинг параметров космической погоды и вариаций геомагнитного поля в Арктике ограничивается лишь небольшой группой спутников и несколькими десятками магнитных станций, расположенных преимущественно на территории США, Канады, северной и центральной Европы. Очевидно, что сложившаяся таким образом ситуация практически исключает возможность оперативного и достоверного диагностирования уровня ГИТ для большей части Арктической зоны РФ (АЗРФ), где фактически единственным доступным индикатором состояния космической погоды по-прежнему остаются полярные сияния.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

В работе в качестве основного источника данных о наличии/отсутствии полярных сияний используется обсерватория “Ловозеро” (LOZ), входящая в состав Полярного геофизического института (ПГИ) и являющаяся практически единственной станцией на территории РФ, непрерывно и в течение долгого времени ведущей наблюдения и регистрацию полярных сияний, вариаций магнитного поля и прочих геофизических эффектов высоких широт, обусловленных процессами в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли. Данные о сияниях в окрестности обсерватории LOZ (рис. 1) анализировались более чем за 10-летний период (с 10.10.2011 по 31.12.2021 гг.), соответствующий наиболее качественным результатам синхронных наблюдений небосвода и уровня ГИТ в субрегионе, ограниченном  $67.97^\circ \text{ N}$ ,  $35.02^\circ \text{ E}$  (с. Ловозеро, Мурманская область, Россия) и  $68.83^\circ \text{ N}$ ,  $33.08^\circ \text{ E}$

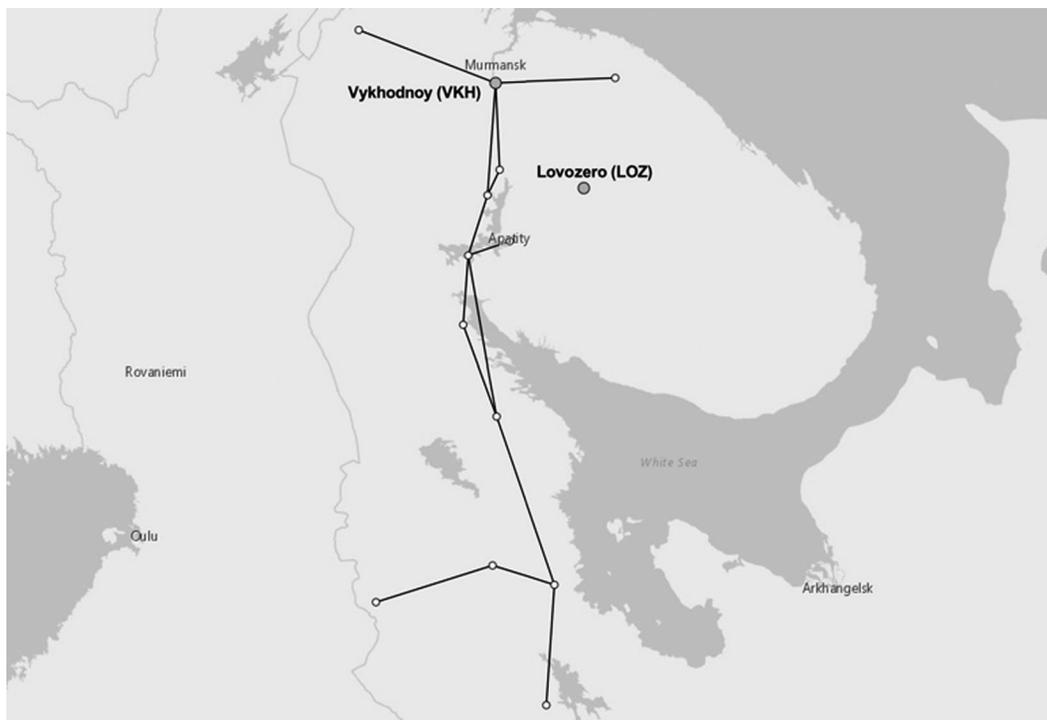


Рис. 1. География магистральной электрической сети “Северный транзит” (сплошная черная линия), обсерватории “Ловозеро” (LOZ) и трансформаторной подстанции “Выходной” (VKH).

(трансформаторная подстанция “Выходной” (VKH), Мурманская область, Россия).

Так, с 2009 г. результаты оптических наблюдений полярных сияний открыто публикуются ПГИ в виде квартальных наборов аскаплов (рис. 2) [Ягодкина и др., 2019], доступных по адресу: [http://pgia.ru/lang/ru/archive\\_pgi](http://pgia.ru/lang/ru/archive_pgi). Однако, как показывает опыт, устоявшийся с 1970-х годов формат представления данных практически неприемлем в задачах интеллектуального анализа больших объемов такого рода информации [Воробьев и др., 2023a]. В этой связи, на основе специально разработанных алгоритмов [Воробьев и др., 2023б], оригинальные аскапловы были конвертированы в соответствующие им электронные таблицы, которые, в свою очередь, синхронизировались со значениями ГИТ, регистрируемыми на станции VKH. Это стало возможным во многом благодаря тому, что в 2011 г. Кольским научным центром РАН (КНЦ РАН) совместно с ПГИ и при содействии Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы (ФСК ЕЭС) была создана региональная система мониторинга токов в нейтралях трансформаторов, накопившая значительный массив информации о влиянии ГМА на магистральную электрическую сеть протяженностью свыше 800 км [Varannik et al., 2012]. В результате в 2022 г.

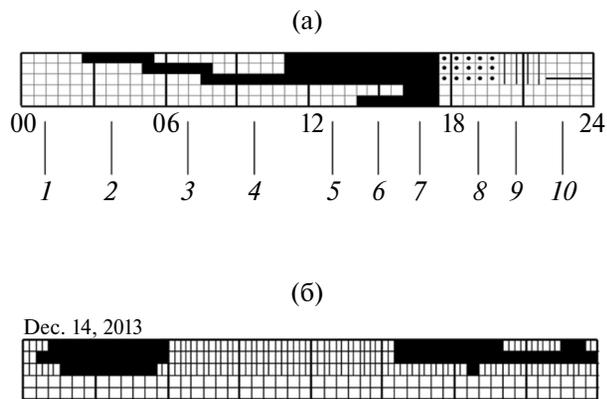
была опубликована база данных измерений ГИТ в нейтралях автотрансформаторов на трех подстанциях (“Выходной”, “Лоухи”, “Кондопога”) 330 кВ магистральной электрической сети “Северный транзит” за период 2011–2022 гг. (Св-во РФ о государственной регистрации базы данных № 2022623220 “Геоиндуктированные токи в магистральной электрической сети “Северный транзит”, <http://gic.en51.ru>) [Селиванов и др., 2023].

Таким образом, в результате оцифровки 1921 аскаплота за 2011–2021 гг. имеем 92 208 эпизодов 30-минутных синхронных наблюдений небосвода в окрестности обсерватории LOZ и уровня ГИТ на станции VKH, представленных в виде таблицы.

$$J_{\text{VKH}n} = \frac{1}{N} \sum_{m=n}^{n+\Delta t_1/\Delta t_2} |J'_{\text{VKH}}|_m, \quad (2)$$

где:  $\Delta t_1$  – шаг дискретизации оптических наблюдений полярных сияний (аскаплов)  $\Delta t_1 = 30$  мин;  $\Delta t_2$  – шаг дискретизации данных по ГИТ  $\Delta t_2 = 0.5$  с;  $J'_{\text{VKH}}$  – оригинальные данные ГИТ, публикуемые ПГИ.

На рис. 3 в качестве примера приведена временная диаграмма синхронной регистрации ГИТ на подстанции VKH и полярных сияний обсерваторией LOZ по состоянию на 14.12.2013 г.



**Рис. 2.** Формат представления данных в виде аскаплота: 1 – сияние не наблюдается; 2 – сияние в северной области; 3 – сияние в зените; 4 – сияние на юге; 5 – сияние в зените, северной и южной областях; 6 – умеренное сияние в зените, кроме этого, свечение присутствует в северной и южной областях; 7 – сильное сияние в зените, кроме этого, свечение присутствует в северной и южной областях; 8 – частичная облачность; 9 – сплошная облачность; 10 – регистрация не проводилась (а); пример аскаплота обсерватории LOZ за 14.12.2013 г. [PGI Geophysical data, 2013] (б).

Как следует из рисунка, периоды наличия/отсутствия сияний соответствуют временным интервалам возникновения значимых вариаций ГИТ. При этом существование сияний в южной части небосвода коррелирует с появлением экстремальных значений ГИТ.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ МЕЖДУ НАБЛЮДЕНИЕМ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И УРОВНЕМ ГИТ

Как известно, тип и характер распределения случайной величины во многом определяются физическими механизмами изучаемого процесса.

Так, например, в результате наблюдения суммирующего воздействия многих случайных слабо взаимосвязанных величин, каждая из которых вносит малый вклад относительно общей суммы, формируется нормальное распределение; в замкнутой системе энергия ее компонентов распределяется по экспоненциальному закону или закону Лапласа (двойное экспоненциальное распределение); случайный мультипликативный набор из нескольких параметров приводит к логнормальному распределению и т.д. Целесообразно при этом учитывать и наличие тяжелых хвостов распределения, указывающих на то, что дисперсия случайной величины определяется преимущественно редкими интенсивными, а не частыми небольшими отклонениями.

Как следует из рис. 4, характер распределения значений  $J_{\text{ВКН}}$  при одновременном наблюдении сияний в различных областях небосвода наилучшим образом соответствует логнормальному закону (3) [Eckhard et al., 2001]. Это подтверждается результатами теста Колмогорова–Смирнова [Dimitrova, 2020], согласуется с полученными ранее результатами [Воробьев и др. 2019; 2021; Vorobev et al., 2022], а также не противоречит исследованиям, опубликованным ПГИ [Воробьев и др., 2018].

$$\text{PDF}(x, s) = \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\log^2 x}{2s^2}\right), \quad (3)$$

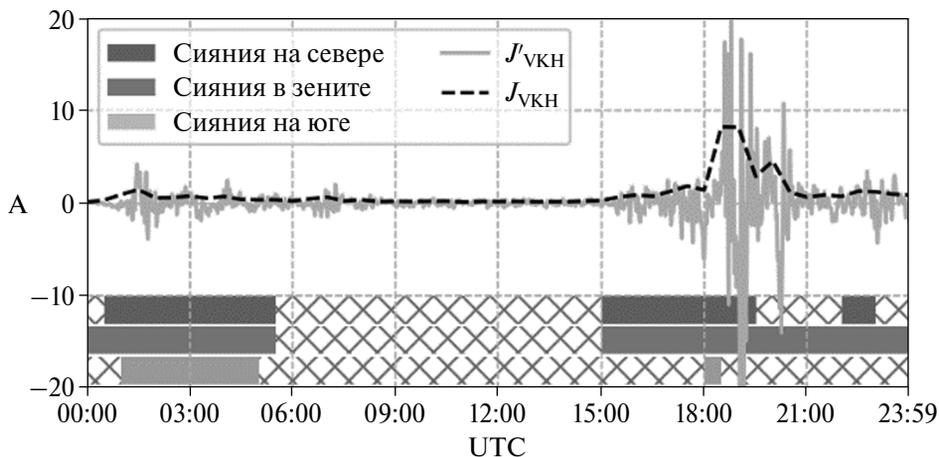
где  $s$  – параметры формы.

Анализ распределения значений ГИТ, представленный на рис. 4, показал, что наиболее вероятный уровень  $J_{\text{ВКН}}$  при наблюдении сияний на севере, в зените и на юге составляет 0.08 А, 0.23 А, и 0.68 А соответственно (рис. 5б), что объясняется расширением аврорального овала в периоды сильной ГМА и предоставляет возможность судить о вероятном уровне

Фрагмент данных синхронного наблюдения полярных сияний и ГИТ после предварительной обработки

№ п/п	UTC	$J_{\text{ВКН}}$ , А	Сияния на севере	Сияния в зените	Сияния на юге
...	...	...	...	...	...
12191	2013-12-14 18:00	1.415	1	1	2
12192	2013-12-14 18:30	8.226	1	1	1
12193	2013-12-14 19:00	8.179	1	1	2
12194	2013-12-14 19:30	2.878	1	1	2
...	...	...	...	...	...

Примечание:  $J_{\text{ВКН}}$  – значение ГИТ, определяемое в соответствии с выражением (2); 0 – сияния отсутствуют; 1 – сияния присутствуют; 2 – облачность.



**Рис. 3.** Сопоставление уровня ГИТ на станции VKH и области наблюдения полярных сияний в окрестности обсерватории LOZ по состоянию на 14.12.2013 г.

индуцированных в высокоширотных ЛЭП токов, как функции от области проявления полярных сияний. Таким образом, как следует из рис. 4, рис. 5, при наблюдении сияний на севере вероятность того, что среднечасовой уровень ГИТ превысит, например, 2 А, составляет  $\sim 6\%$ , в то время как при наблюдении сияний в зените и на юге вероятность превышения ГИТ аналогичного уровня составляет  $\sim 10\%$  и  $\sim 15\%$  соответственно (рис. 5б). Вероятность же того, что  $J_{VKH}$  превысит 10 А в период сияний на юге составляет 0.15, против 0.06 и 0.04% при наблюдении сияний в зените и на севере соответственно.

Эти же физические механизмы ответственны за формирование геометрии хвоста распределения, связанного с частотой возникновения экстремальных ГИТ (рис. 4, рис. 5). Так, например, статистика значений ГИТ при сияниях на юге (рис. 4в) имеет минимальные значения асимметрии и эксцесса, что характеризует наиболее толстый хвост, а следовательно, максимальную частоту возникновения экстремальных ГИТ в эти периоды.

Наряду с этим в периоды наблюдения слабых диффузионных сияний на севере, либо их отсутствия, статистика ГИТ характеризуется наивысшими показателями асимметрии и эксцесса, что указывает на то, что значения  $J_{VKH}$  максимально сконцентрированы в области нижнего диапазона и имеют наименьшую неопределенность (рис. 5а).

Также анализ рис. 4, рис. 5 указывает и на то, что возникновение экстремальных ГИТ практически определяет наличие полярных сияний, однако наблюдение сияний не гарантирует

возникновения экстремальных значений ГИТ, т.е. не является достаточным условием для их появления.

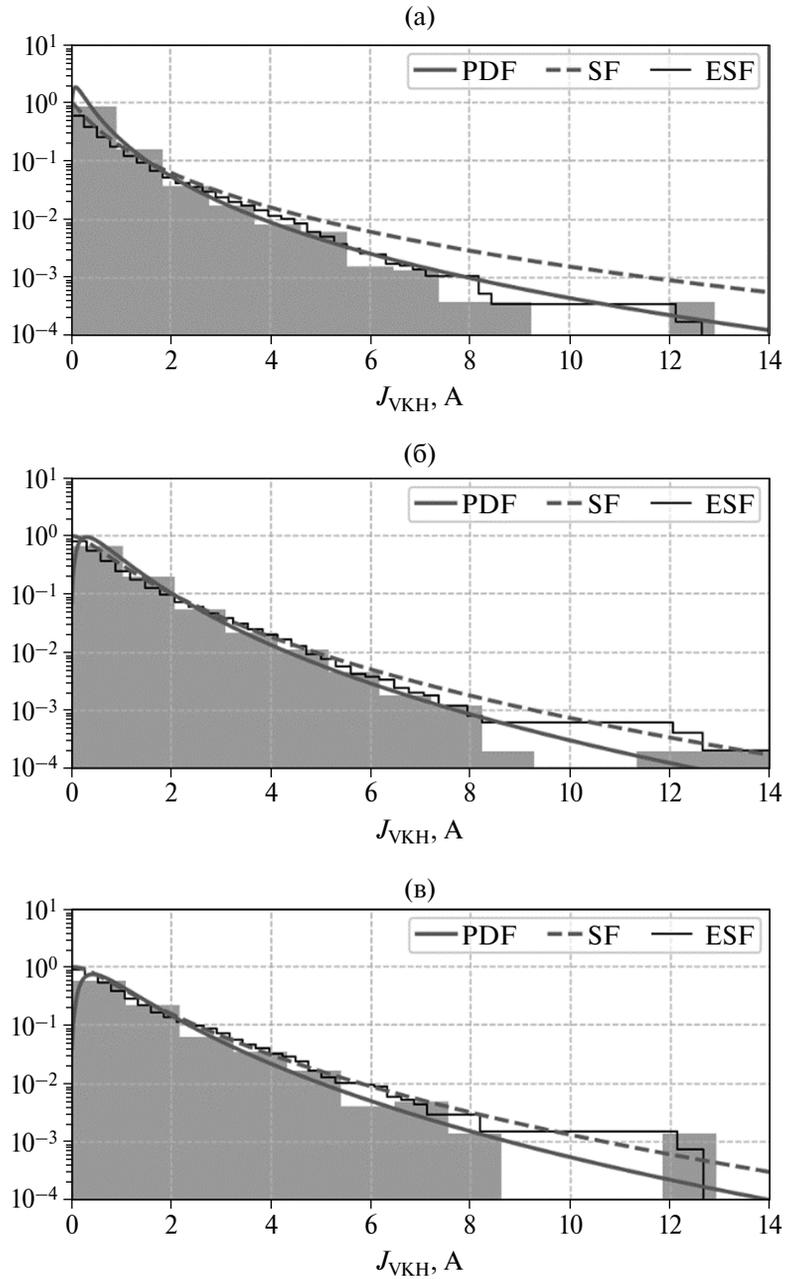
Корреляционный анализ значений  $J_{VKH}$  с областью проявления сияний, в свою очередь, также обнаруживает явную связь между токовыми наводками в высокоширотных энергосистемах и областью наблюдения полярных сияний. При этом в периоды наблюдения сияний в зените коэффициент ранговой корреляции Спирмена определяется на уровне  $\sim 0.7$ , что в 2 раза выше относительно случаев возникновения сияний на севере или юге. Такой результат может указывать на то, что ГИТ нелинейно связаны с уровнем ГМА и сильно зависят от расположения объекта воздействия относительно границ аврорального овала.

### СИНТЕЗ И ВЕРИФИКАЦИЯ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИТ

Рассмотрим базовый подход к диагностированию уровня ГИТ по данным наблюдений полярных сияний на основе теоремы Байеса:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (4)$$

где:  $P(A)$  – априорная вероятность гипотезы  $A$  или априорное распределение;  $P(A|B)$  – вероятность гипотезы  $A$  при наступлении события  $B$  (апостериорная вероятность);  $P(B|A)$  – вероятность наступления события  $B$  при истинности гипотезы  $A$ ;  $P(B)$  – полная вероятность наступления события  $B$ , определяемая в соответствии с выражением (5).



**Рис. 4.** Статистика ГИТ при наблюдении сияний на севере (а), в зените (б) и на юге (в). Серая сплошная и пунктирная линии соответствуют функциям плотности вероятности (PDF) и выживаемости (SF) логнормального закона распределения соответственно. Черная сплошная линия – эмпирическая функция выживаемости (ESF).

$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(B|A_i)P(A_i), \quad (5)$$

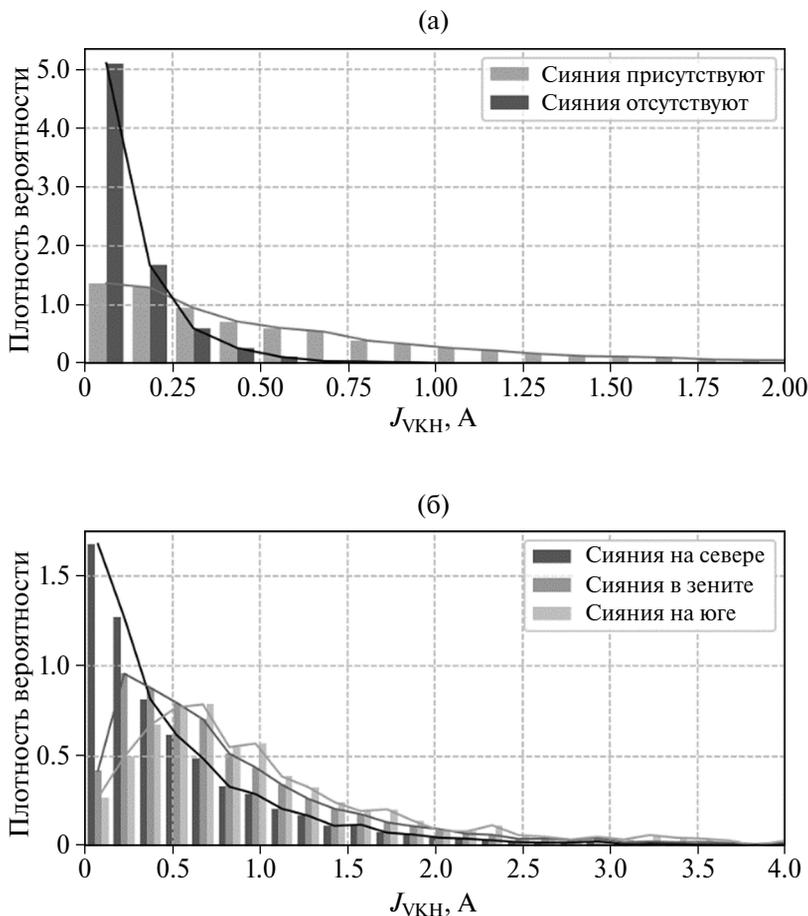
где вероятности под знаком суммы известны или допускают экспериментальную оценку.

Тогда, в контексте решаемой задачи имеем:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B|A)P(A) + P(B|\sim A)P(\sim A)}, \quad (6)$$

где:  $P(A|B)$  – вероятность того, что при наблюдении сияний в заданной области  $J_{VKH} \geq J_0$ , где  $J_0 = \text{const}$  – некоторое заданное значение ГИТ;  $P(B|A)$  – вероятность наблюдения сияний в заданной области при  $J_{VKH} \geq J_0$ ;  $P(A)$  и  $P(\sim A)$  – вероятности того, что  $J_{VKH} \geq J_0$  и  $J_{VKH} < J_0$  соответственно;  $P(B|\sim A)$  – вероятность наблюдения сияний в заданной области при  $J_{VKH} < J_0$ .

Таким образом, апостериорная вероятность того, что при наблюдении сияний на севере



**Рис. 5.** Гистограмма распределения 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,  $s$  – среднеквадратическое отклонение [Scott, 1979] и соответствует  $\sim 0.15 \text{ A}$ .

уровень ГИТ на станции ВКН превысит 2 А, составляет 5.78%, в то время как вероятность превышения данного значения при существовании сияний в зените и на юге составляет 10.04 и 14.93% соответственно (рис. 6). В отсутствие же сияний вероятность достижения  $J_{\text{ВКН}}$  аналогичного уровня не превышает 0.26%, а вероятность превышения 3 А уже практически равна нулю.

Как следует из рис. 6, зависимость вероятности превышения ГИТ уровня  $J_0$  имеет выраженный экспоненциальный характер, зависит от области проявления (относительно объекта воздействия) сияний, и достаточно хорошо (с невязкой, не превышающей  $10^{-8}$  измеряемой величины) может быть аппроксимирована выражением вида:

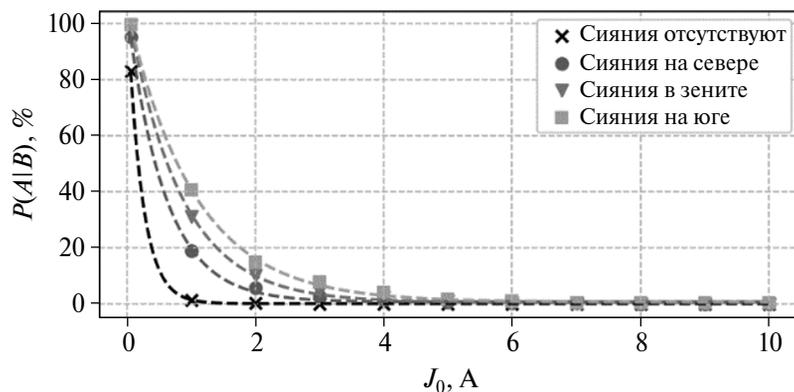
$$P(A|B) \approx P(J_0) = a \cdot \exp(bJ_0) + c, \quad (4)$$

где  $a = 102.87$  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.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты, по-видимому, указывают на то, что наличие сияний является необходимым, но недостаточным условием существования экстремальных ГИТ. При этом явно прослеживается взаимосвязь между областью наблюдения сияний и значением индуцируемых токов в высокоширотных энергосистемах заданного субрегиона, что при определенных условиях допустимо использовать в качестве естественного индикатора, характеризующего вероятный уровень ГИТ.



**Рис. 6.** Апостериорная вероятность превышения ГИТ на станции ВКН уровня  $J_0$  при одновременном наблюдении сияний в различных областях небосвода. Маркерами отмечены расчетные (эмпирические) значения; пунктирной линией – аппроксимация эмпирических значений выражением (4).

Предварительные исследования также обнаруживают корреляцию уровня ГИТ с интенсивностью свечения и структурой сияний (рис. 7). Так, например, по данным синхронной регистрации состояния небосвода и ГИТ по состоянию на 21.12.2016 г. для периодов отсутствия сияний (12:48 UT) среднeminутный уровень ГИТ составлял 0.1 А, для диффузионных сияний (17:07 UT) – 0.7 А, а для интенсивных сияний типа “дуга” (15:35 UT) и “вихрь” (15:43 UT) – 1.34 А и 13.06 А соответственно.

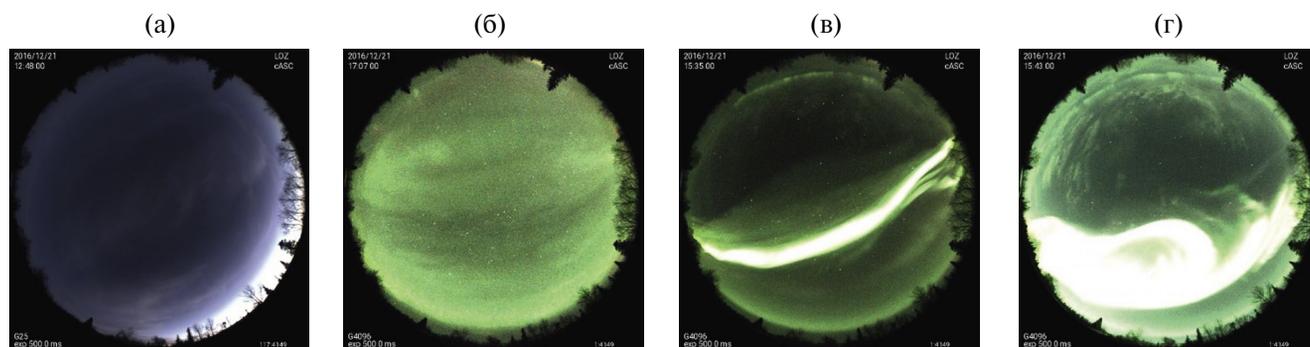
Таким образом, естественно предположить, что оперативная идентификация интенсивности свечения и типа сияний (например, “диффузионные”, “дуга” или “вихрь”) способна значимо повысить эффективность применения естественных индикаторов состояния космической погоды для оценки эффектов ее воздействия на объекты высокоширотной инфраструктуры.

В заключение необходимо отметить, что поскольку в работе использовались преимущественно статистические методы, числовые значения

некоторых полученных здесь результатов являются оценочными и в случае иных экспериментальных данных могут варьироваться, однако соотношения между ними сохраняются.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что наивысшие риски снижения уровня техносферной безопасности, связанные с эффектами воздействия космической погоды на энергосистемы, определяются в области аврорального овала, существующие системы мониторинга, призванные оперативно диагностировать экстремальные ГИТ в энергосистемах АЗРФ находятся в зачаточном состоянии и практически малоэффективны. Вследствие этого фактически единственным повсеместно доступным индикатором состояния космической погоды остаются полярные сияния, анализ свойств которых способен снизить общий уровень ситуационной неосведомленности о вероятном уровне токовых наводок.



**Рис. 7.** Состояние небосвода, зарегистрированное All-sky-камерой [Sigernes, 2014] обсерватории LOZ в различное время суток 21.12.2016 г.: (а) – сияния отсутствуют; (б) – диффузионные сияния; (в) – сияния типа “дуга”; (г) – сияния типа “вихрь”.

Проанализировав 1921 аскаплот более чем за 10-летний период наблюдений, включающий 92 208 эпизода 30-минутных наблюдений небосвода в окрестности станции LOZ было показано, что наиболее вероятный уровень ГИТ на станции ВКН при регистрации сияний на севере, в зените и на юге составляет 0.08, 0.23, и 0.68 А соответственно. При этом апостериорная вероятность того, что во время сияний на севере  $J_{\text{ВКН}}$  превысит 2 А составляет 5.78%, в то время как вероятность превышения данного значения при сияниях в зените и на юге составляет 10.04 и 14.93% соответственно. В отсутствие же сияний вероятность достижения  $J_{\text{ВКН}}$  аналогичного уровня не превышает 0.26%, а вероятность превышения 3 А практически равна нулю.

Также показано, что вероятность превышения ГИТ некоторого определенного значения имеет экспоненциальный характер, явно зависит от области проявления сияний, и может быть аппроксимирована выражением вида  $P(A|B) \approx P(J_0) = a \cdot \exp(bJ_0) + c$ , где  $P(A|B)$  – вероятность превышения ГИТ определенного значения  $J_0$  при наблюдении сияний в заданной области;  $a$ ,  $b$  и  $c$  – коэффициенты, определяемые эмпирическим образом.

Повысить общую эффективность предложенного подхода возможно путем дополнительной идентификации интенсивности свечения и формы наблюдаемых сияний. При этом естественным ограничением применимости предложенного подхода является то, что наземная регистрация сияний на ночном небосводе в высоких широтах возможна лишь до 7 месяцев в год при условии благоприятной метеорологической обстановки.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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 геоиндуцированным токам, регистрируемым на станции “Выходной”.

Кроме этого, авторы благодарят рецензентов за ряд конструктивных замечаний и предложений, позволивших существенно улучшить качество работы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Воробьев А.В., Лапин А.Н., Воробьева Г.Р.* Программное обеспечение для автоматизированного распознавания и оцифровки архивных данных оптических наблюдений полярных сияний // Информатика и автоматизация. 2023. № 22(5). С. 1177–1206. <https://doi.org/10.15622/ia.22.5.8>
- 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
- 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
- Воробьев А.В., Соловьев А.А., Пилипенко В.А., Воробьева Г.Р., Гайнетдинова А.А., Лапин А.Н., Белуховский В.Б., Ролдугин А.В.* Локальная диагностика наличия полярных сияний на основе интеллектуального анализа геомагнитных данных // Солнечно-земная физика. 2023. № 2. С. 26–34. DOI: <https://doi.org/10.12737/szf-92202303>
- 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.
- Гишиани 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.
- Данилов Г.А.* Повышение качества функционирования линий электропередачи. Монография. Москва–Берлин. 2015.
- Зеленый Л.М., Петрукович А.А.* Арктика. Космическая погода // Природа. 2015. № 9. С. 31–39.
- Канониди Х.Д., Ораевский В.Н., Белов А.В., Гайдаш С.П., Лобков В.Л.* Сбой 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

- 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. № 12–2 (125). С. 360.
- Пуляев В.И., Усачёв Ю.В. Магнитная буря – причина отключения ВЛ 330 кВ // Энергетик. 2002. № 7. С. 18.
- Селиванов В.Н., Аксенович Т.В., Билин В.А., Колобов В.В., Сахаров Я.А. 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
- Соколова О.Н., Сахаров Я.А., Грицутенко С.С., Коровкин Н.В. Алгоритм анализа устойчивости энергосистем к геомагнитным бурям // Изв. РАН. Энергетика. 2019. С. 33–52. DOI: 10.1134/S0002331019050145
- 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
- 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. V. 55. № 1. P. 110–115. DOI: 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 // Journal of Statistical Software. 2020. № 95(10). P. 1–42. DOI: 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 [Электронный ресурс], режим доступа: <https://static1.squarespace.com/static/57bc8a4a414fb50147550a88/t/57d84e4d1b631b96124f3c69/1473793614089/2015+Zurich-Electrical+Claims+and+Space+Weather.pdf>
- 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. V. 51. № 5. P. 341–352. DOI: 10.1641/0006-3568(2001)051[0341:LNDATS]2.0.CO;2
- Kataoka R., Ngwira C. Extreme geomagnetically induced currents // Prog. in Earth and Planet. Sci. № 3. 2016. P. 23.
- PGI Geophysical data. January, February, March 2013 / V. Vorobjev (ed.). Murmansk. Apatity: PGI KSC RAS. 2013.
- Pilipenko V.A., Chernikov A.A., Soloviev A.A., Yagova N.V., Sakharov Ya.A., Kostarev D.V., Kozyreva O.V., Vorobev A.V., Belov A.V. Influence of space weather on the reliability of the transport system functioning at high latitudes // Russian Journal of Earth Sciences. 2023. V. 23. P. ES2008. DOI: 10.2205/2023ES000824
- Radasky W., Emin Z., Adams R. et al. 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. V. 66. P. 605–610.
- Sigernes F., Holmen S.E., Biles D. et al. Auroral all-sky camera calibration // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2014. № 3. P. 241–245. DOI: <https://doi.org/10.5194/gi-3-241-2014>
- Soloviev A.A., Sidorov R.V., Oshchenko A.A. [et al.] On the need for accurate monitoring of the geomagnetic field during directional drilling in the Russian Arctic // Izv. Phys. Solid Earth. 2022. № 58. P. 420–434. DOI: 10.1134/S1069351322020124
- Vorobev A., Soloviev A., Pilipenko V., Vorobeva G., Sakharov Y. An approach to diagnostics of geomagnetically induced currents based on ground magnetometers data // Applied Sciences. 2022. № 12. P. 1522. DOI: 10.3390/app12031522
- Wintoft P., Wik M., Viljanen A. Solar wind driven empirical forecast models of the time derivative of the groundmagnetic field // J. Space Weather Space Clim. 2015. № 5. P. A7. DOI: 10.1051/swsc/2015008

## An Approach to Interpreting Natural Indicators of the State of Space Weather to Assess the Effects of its Impact on High-Latitude Power Systems

A. V. Vorobev<sup>a,b,\*</sup>, A. N. Lapin<sup>b</sup>, A. A. Soloviev<sup>a,c</sup>, G. R. Vorobeva<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Geophysical Center of the RAS, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

<sup>c</sup>Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia

\*e-mail: [geomagnet@list.ru](mailto:geomagnet@list.ru)

Received February 14, 2024

revised March 04, 2024

accepted March 05, 2024

**Abstract** – The dynamic exploration and development of the Arctic zone of the Russian Federation is inextricably connected with the need to minimize technospheric risks, including those associated with the space weather effects on power equipment systems operated within the boundaries of the auroral oval. At the same time,

accompanying monitoring of space weather parameters and geomagnetic field variations in the Arctic is carried out only through a group of satellites and several dozen magnetic stations located mainly in the United States, Canada, northern and central Europe. Obviously, the current situation practically excludes the possibility of promptly diagnostics of the level of geinduced currents (GIC) for most of the Arctic zone of the Russian Federation, where in fact the only available indicator of the state of space weather is auroras. In the paper the authors propose an approach to interpreting the manifestation of auroras to assess the effects of space weather on objects and systems of high-latitude infrastructure. Thus, using the example of the “Vykhodnoy” substation of the “Severny Transit” main electrical network, it is shown that when recording auroras in the north, zenith and south, the most probable (averaged over 30 min) GIC level is 0.08, 0.23 and 0.68 A accordingly. In this case, the probability that the average half-hour GIC level will exceed 2 A (in the case of auroras in the north, zenith and south) is  $\sim 6\%$ ,  $\sim 10\%$  and  $\sim 15\%$ , respectively. In conclusion, ways of modernization and the limits of applicability of the proposed approach are considered.

*Keywords:* geinduced currents, auroras, geomagnetic variations, space weather, high-latitude infrastructure, statistical analysis