

Министерство науки и высшего образования РФ

Воробьев Андрей Владимирович

ФГБУН Геофизический центр РАН

Применение сверточных нейронных сетей для  
дистанционного зондирования верхней ионосферы с  
использованием данных всепогодной камеры

(Application of Convolutional Neural Networks for Upper  
Ionosphere Remote Sensing Using All-Sky Camera Data)

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

03 июля 2025 г



# ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ КАК ФАКТОР НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ПРИНЯТИИ РЕШЕНИЙ В АЗРФ

## ТИПЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ:

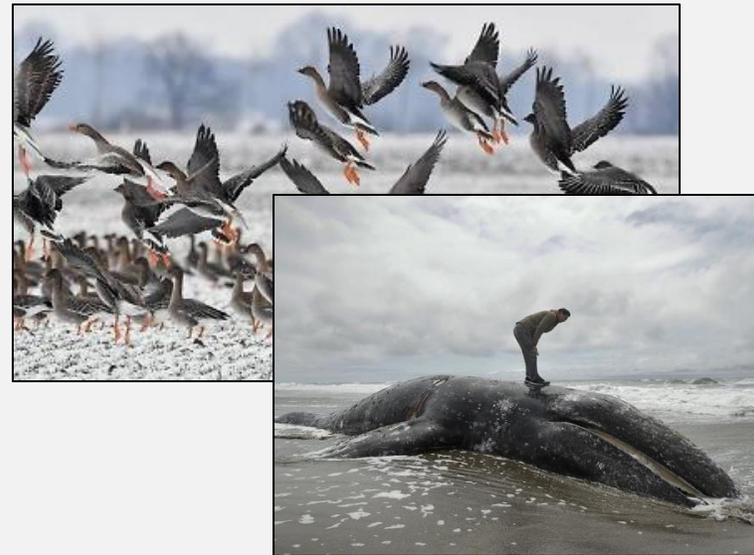
- неопределенности, связанные с человеческим фактором;
- неопределенности, связанные с социальным и административным фактором;
- неопределенности, связанные с экономическим фактором;
- неопределенности, связанные с внешне- и внутривластным фактором;
- неопределенности, связанные с отсутствием / недостатком информации (информационная неопределенность);
- неопределенности, связанные с недостаточными знаниями о природе, природных явлениях, механизмах их возникновения и воздействия на биологические и технические системы.

В периоды магнитных бурь погрешность высокоточной навигации GPS-приемников в режиме PPP (англ. Precise Point Positioning), эксплуатируемых в области высыпания авроральных электронов в ионосферу, может увеличиваться до пяти раз относительно фонового уровня [Yasyukevich et al., 2018, 2020]



Термическое повреждение силовых трансформаторов вследствие магнитной бури. Провинция Квебек, Канада (13 марта 1989 г.).

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], токи с интенсивностью даже несколько ампер достаточны для того, чтобы вывести некоторые типы трансформаторов из линейного режима в режим насыщения и спровоцировать аварийную ситуацию.



Последствия принятия ошибочных решений из-за низкой ситуационной осведомленности при местопределении в Арктике



## ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ГИТ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ

- **Квебекский блэкаут 13 марта 1989 г.** [Kataoka et al., 2016].);
- **Инциденты в России** в ноябре 2001 г., октябре 2003 г. [Пуляев и др., 2015; Данилов, 2015], 17 марта 2015 г. зарегистрированы аномальные токи в ЛЭП 500 кВ в Красноярском крае и отклонения в работе трансформаторов на подстанции «Ачинская» [Селиванов М.В., 2016];
- **Хэллоуинские бури** в Швеции (г. Мальмё) 29-30 октября 2003 г. [Radasky et al., 2019];
- **Инциденты в ЮАР** в октябре 2003 г. [Gaunt & Coetzee, 2007], в марте 1989 г. (Квебекское событие) [Bernard, L., et al., 1990], в марте 2015 г. (буря «Святого Патрика») [Lotz, S., & Cilliers, P. J., 2015];
- В 2001 г. в **Новой Зеландии** ГИТ вызвали нагрев трансформаторов в Окленде, существенно сократив их срок службы [MacManus et al., 2002]

и др.

## ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

- Согласно отчету Zurich Insurance Group в США за период 2005–2015 гг вследствие возросшей геомагнитной активности (ГМА) было зафиксировано 47 случаев повреждения энергооборудования. Страховые выплаты компаний при этом составили более 1.9 млрд. долларов [Dobbins et al., 2015].
- Квебекский блэкаут нанес ущерб \$13 млрд (с учётом инфляции – \$ 30 млрд в 2024 г.). [NASA 2021, Schrijver et al., 2014].
- Согласно отчёту Минэнерго РФ (2002). Авария 06.11.2001 г. в энергосистеме Мурманской области нанесла ущерб от простоя промышленных предприятий Мурманской области – ~500 млн руб. (в ценах 2001 г.). Кроме этого потребовалось 120 млн руб. на восстановление работы подстанции.

Согласно прогнозам NASA вероятность повторения события уровня Кэррингтона в ближайшие 10 лет – ~12%. [Schrijver et al., 2014; NASA, 2021]. Ущерб в результате наступления такого события исчисляется триллионами долларов США.

National Aeronautics and Space Administration



1

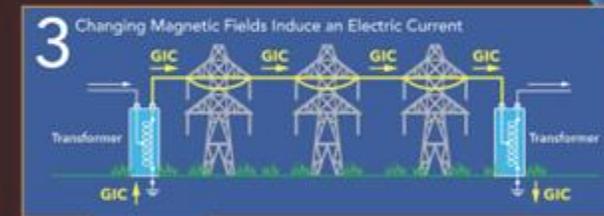
Coronal Mass Ejection (CME)

## GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS

2

Earth's Geomagnetic Field

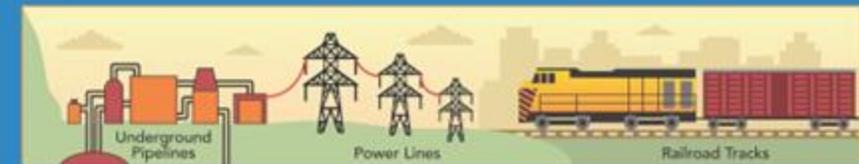
Geomagnetically Induced Currents (GICs) can result from geomagnetic storms—a type of space weather event in which Earth's magnetic field is rattled by incoming magnetic solar material. Most GICs are triggered by coronal mass ejections (1), or CMEs, which interact with the magnetic field around Earth (2) and cause it to rattle. The quick-changing magnetic fields create GICs through a process called electromagnetic induction (3). GICs can flow through railroad tracks, underground pipelines, and power grids. In extreme cases, they can cause blackouts.



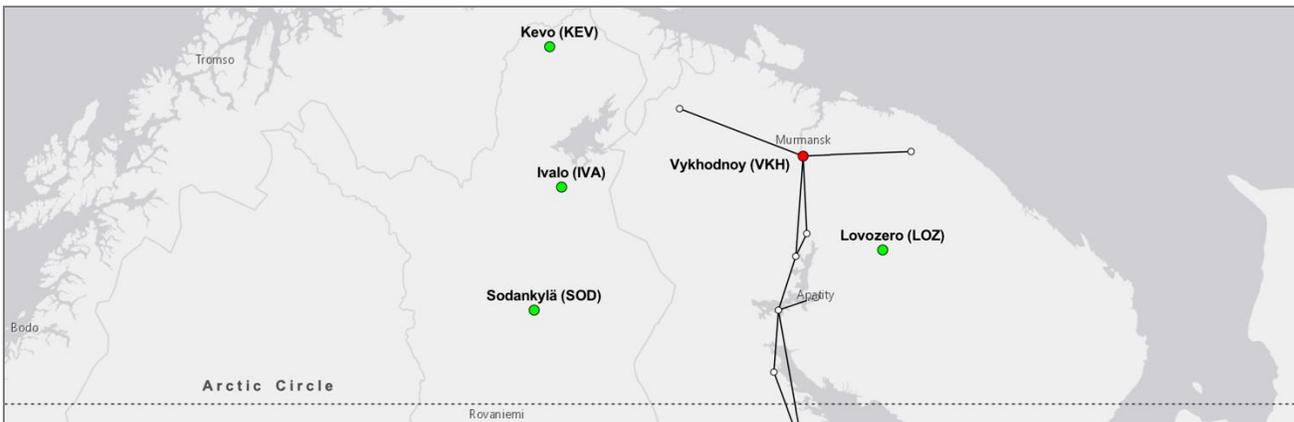
### WHAT IS THE IMPACT?

Though widespread permanent damage to power systems is unlikely, extreme storms can cause blackouts over extended areas. That's why NASA and other federal agencies work with the power and insurance industries to develop plans and standards for dealing with GICs.

### GICs CAN RUN THROUGH ANY LONG METAL STRUCTURE



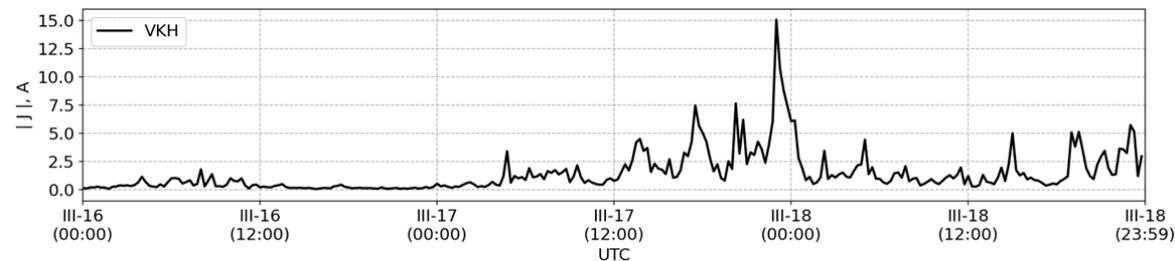
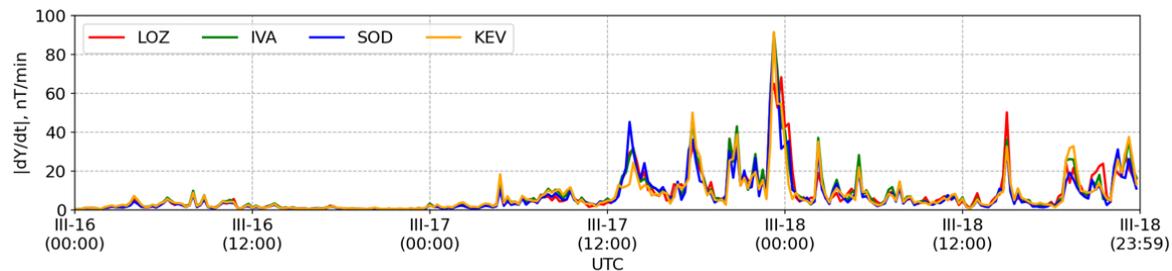
# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГИТ



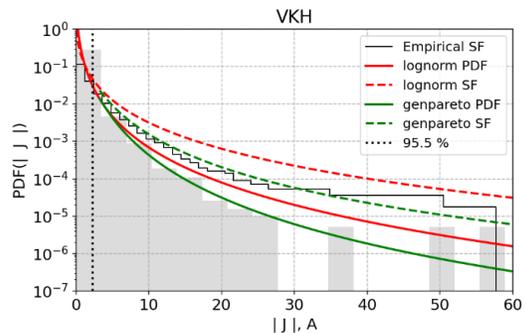
География магистральной электрической сети «Северный транзит» (сплошная черная линия), включающей трансформаторную подстанцию «Вукходной» (красный маркер). Зеленые маркеры соответствуют окрестным магнитным станциям.

Корреляция значений  $|J_{VKH}|$  со значениями геомагнитных вариаций (данные усреднены по 15-минутным интервалам)

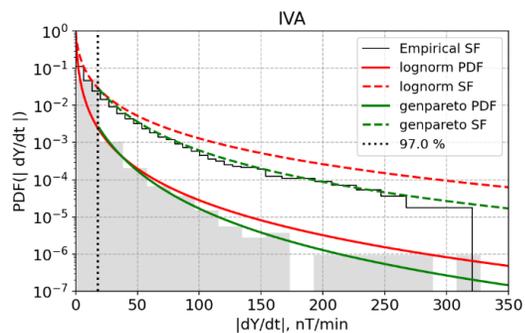
	$ dY_{LOZ}/dt $	$ dY_{IVA}/dt $	$ dY_{SOD}/dt $	$ dY_{KEV}/dt $	IE-index
r	0.882	0.878	0.847	0.841	0.772



Сопоставление временных рядов ГИТ (подстанция «Выходной» магистральной электрической сети «Северный транзит») и варибельности возмущенной составляющей окрестных магнитных станций по состоянию на 16-18 марта 2015 г



а



б

Анализ статистической однородности целевой функции ( $J_{VKH}$ ) и признаков переменных: а – ГИТ на трансформаторной подстанции VKH; б – варибельность восточной составляющей ГМВ и проксителлурическое поле на станции IVA;

Vorobev, A.V., Vorobeva, G.R. Machine Learning for Diagnostics of Space Weather Effects for the Arctic Region. Moscow Univ. Phys. 78 (Suppl 1), S226–S235 (2023). <https://doi.org/10.3103/S0027134923070317>

# ПОДХОД К ДИАГНОСТИКЕ ГИТ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ

Оценка коэффициента детерминации  $R^2$  показала, подходы, основанные на методе множественной линейной регрессии и искусственной нейронной сети с функцией активации на базе линейного выпрямителя (ReLU), является наилучшими ( $R^2=0.816$  и  $R^2=0.814$  соответственно). Так, например в случае применения диагностики ГИТ посредством множественной линейной регрессии (1), искомая модель будет иметь вид выражения (2).

$$f(x, \beta) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k = \sum_{j=1}^k \beta_j x_j = x^T \beta, \quad (1)$$

где  $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  – вектор регрессоров;  $\hat{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)^T$  – вектор столбец коэффициентов;  $k$  – число признаков модели.

$$|J_{VKH}| = \beta_0 + \beta_1 \left| \frac{dY_{LOZ}}{dt} \right| + \beta_2 \left| \frac{dY_{IVA}}{dt} \right| + \beta_3 \left| \frac{dY_{KEV}}{dt} \right| + \beta_4 IE, \quad (2)$$

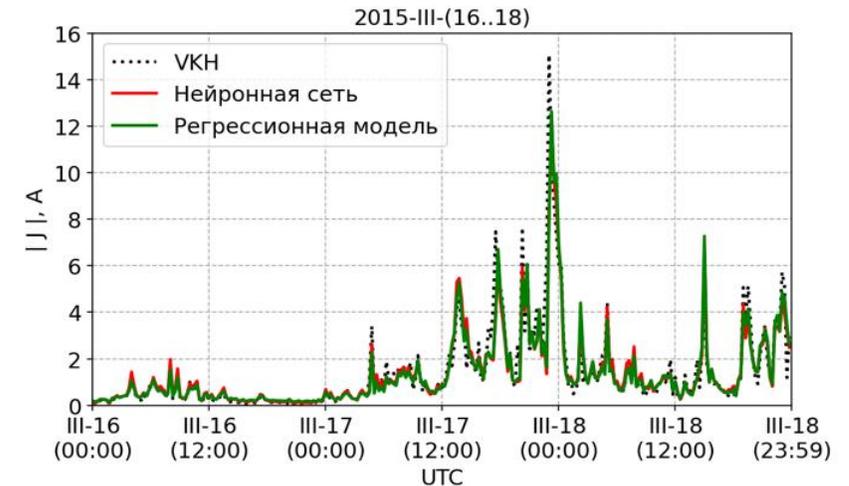
где  $\beta_0 = 0.1$ ;  $\beta_1 = 90.56 \cdot 10^{-3}$ ;  $\beta_2 = 32.25 \cdot 10^{-3}$ ;  $\beta_3 = 32.36 \cdot 10^{-3}$ ;  $\beta_4 = 0.37 \cdot 10^{-3}$ .

RMSE ~ 0.34 A; R ~ 0.9; Т-тест Стьюдента (p-значение = 0.87)

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. No. 12. P. 1522. DOI: 10.3390/app12031522.



а



б

Результат диагностирования ГИТ на базе интеллектуальных методов

**! Не определены условия при которых зависимости сохраняют линейный характер.**

# ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

Время неработоспособного состояния системы ( $T_F$ ):

$$T_F = T - T_W, \quad (3)$$

где  $T$  – наработка;  $T_W$  – число информативных значений (общее время работоспособного состояния) за период времени  $T$ .

Среднее время до восстановления рабочего состояния  $\langle T2R \rangle$  (эквивалент математического ожидания размера отсутствующего фрагмента) и среднее время наработки между отказами системы  $\langle T2F \rangle$  (эквивалент среднего фрагмента данных без пропусков):

$$\langle T2R \rangle = \frac{1}{N_F} \sum_{i=1}^{N_F} T2R_i = \frac{T_F}{N_F}; \quad (4) \quad \langle T2F \rangle = \frac{1}{N_W + k} \sum_{i=1}^{N_W + k} T2F_i = \frac{T_W}{N_W + k}, \quad (5)$$

где  $T2R_i$  – время до  $i$ -го восстановления системы после отказа,  $T2F_i$  – время до  $i$ -го отказа системы;  $N_F$  и  $N_W$  – число отказов системы и число восстановлений после отказа соответственно;  $k = 1$  или  $0$ , если в момент начала наблюдения система находилась работоспособном или неработоспособном состоянии соответственно.

Время безотказной работы системы:

$$T_W^{\sim} = \left| \bigcap_N K \right|, \text{ где } K = \{k_j\}_{j=1}^{T-T_F}: S_{k_j} \neq \emptyset, k_j \in [1, T]; S = \{s\}_{i=1}^T. \quad (6)$$

# АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

Для магнитных обсерваторий сети **INTERMAGNET** [Love, 2013] (более 120 станций), поддерживающей наивысший стандарт качества, размеры пропущенных фрагментов занимают достаточно широкий диапазон и варьируются как во времени, так и от станции к станции. Для станции **Alma Ata (AAA)** в 2015 г. число пропущенных значений составило **36 %** от годовой наработки, для станции **Dalat (DLT)** – более **12 %**, для станции **Sodankyla (SOD)** – **0.4 %**, и т. д.

Результаты оценки показателей надежности МВС (на примере магнитометров сети IMAGE, 2015 г)

№ п/п	IAGA код	Геогр. координаты		T <sub>w</sub>		T <sub>F</sub>		F	<T2R> [мин]	<T2F> [мин]
		Ф N, [град]	Λ E, [град]	[мин]	[%]	[мин]	[%]			
1	NAL	78.92	11.95	509551	96.947	16049	3.053	20	802.45	25477.55
2	LYR	78.20	15.82	506314	96.331	19286	3.669	11	1753.27	46028.55
3	HOR	77.00	15.60	466554	88.766	59046	11.234	4	14761.5	116638.5
4	HOP	76.51	25.01	492524	93.707	33076	6.293	49	675.02	10051.51
5	BJN	74.50	19.20	525523	99.985	77	0.015	7	11	75074.71
6	NOR	71.09	25.79	519087	98.761	6513	1.239	144	45.23	3604.77
7	SOR	70.54	22.22	523740	99.646	1860	0.354	43	43.26	12180.0
8	KEV	69.76	27.01	525569	99.994	31	0.006	11	2.82	47779.0
9	TRO	69.66	18.94	524713	99.831	887	0.169	15	59.13	34980.87
10	MAS	69.46	23.70	524144	99.723	1456	0.277	73	19.95	7180.05
11	AND	69.30	16.03	525284	99.94	316	0.06	6	52.67	87547.33
12	KIL	69.06	20.77	523732	99.645	1868	0.355	33	56.61	15870.67
13	IVA	68.56	27.29	486940	92.645	38660	7.355	6	6443.33	81156.67
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	KAR	59.21	5.24	524637	99.817	963	0.183	41	23.49	12796.02
32	TAR	58.26	26.46	525137	99.912	463	0.088	12	38.58	43761.42
33	BRZ	56.17	24.86	523584	99.616	2016	0.384	3	672.0	174528.0
34	SUW	54.01	23.18	487904	92.828	37696	7.172	20	1884.8	24395.2
35	WNG	53.74	9.07	525577	99.996	23	0.004	19	1.21	27661.95
36	NGK	52.07	12.68	525600	100	0	0	0	–	–

В 50 % случаях магнитных станций сети **IMAGE** [Tanskanen, 2009] (более 40 станций) мат. ожидание размера пропущенного фрагмента превышает **58.5 мин.** Усредненный (по всем станциям) размер пропущенного фрагмента составляет **1066 мин.** Мат. ожидание числа отказов с восстановлением по всем станциям превышает **45/год.** При этом 50 % станций испытывают за год более **17 отказов.** В крайних случаях **общий объем пропусков на одной станции превышает 11.2% (41 сутки)** от общего размера годовой выборки, при этом **среднее время восстановления превышает 10 суток** [Vorobev, 2021].

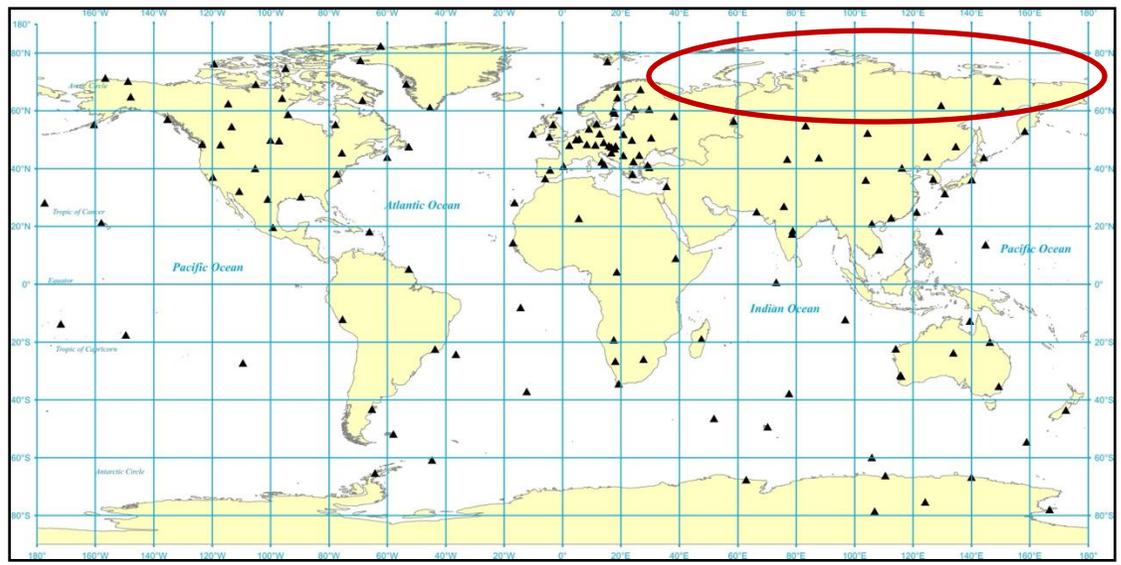
Love J. An International Network of Magnetic Observatories // EOS, transactions, American Geophysical Union. V. 94. No 42. P. 373–384. 2013.

Tanskanen, E.I. (2009): A comprehensive high-throughput analysis of substorms observed by IMAGE magnetometer network: Years 1993-2003 examined. J. Geophys. Res., 114, A05204, doi:10.1029/2008JA013682

Vorobev A.V., Pilipenko V.A. Geomagnetic data recovery approach based on the concept of digital twins. Solar-Terrestrial Physics. 2021. Vol. 7. Iss. 2. P. 48–56. DOI: 10.12737/stp-72202105.

# ГЕОГРАФИЯ СТАЦИОНАРНЫХ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ

INTERMAGNET

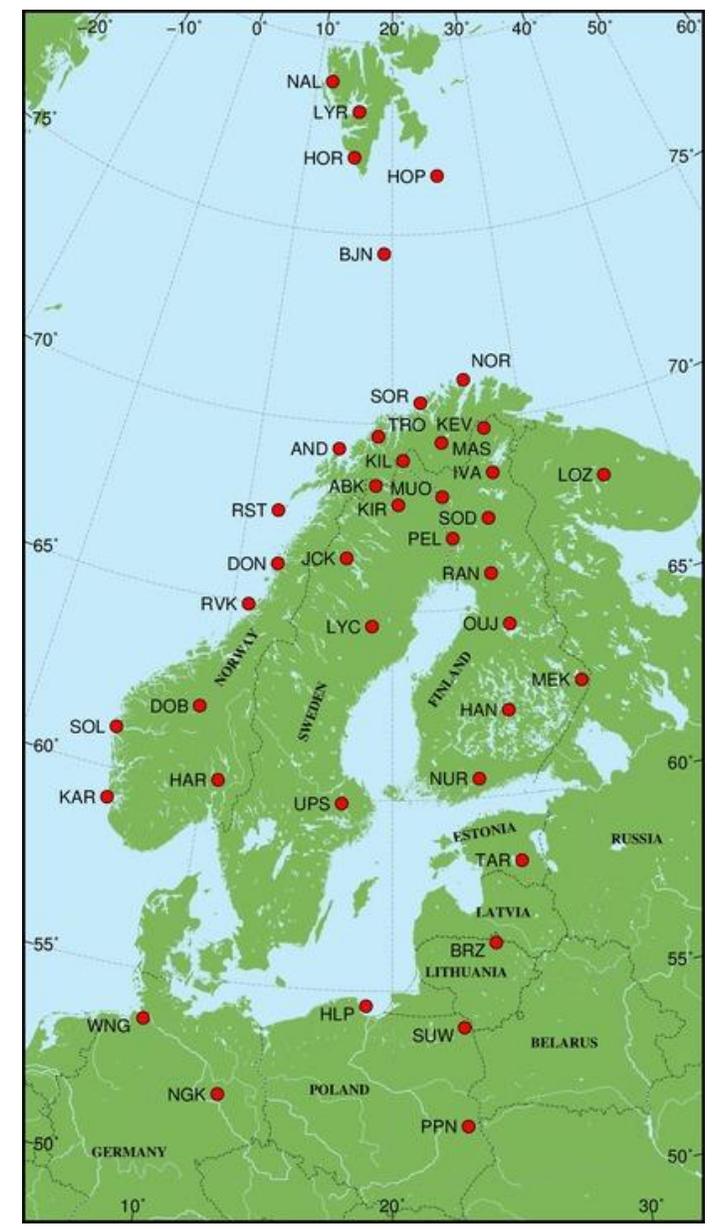


SuperMAG



а

IMAGE

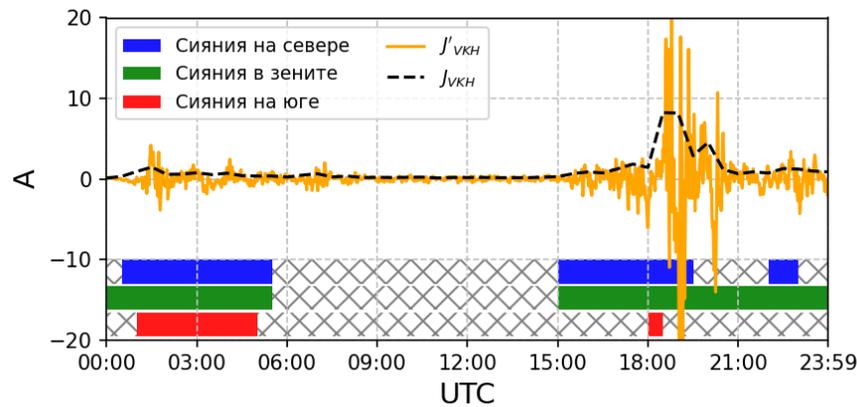


б

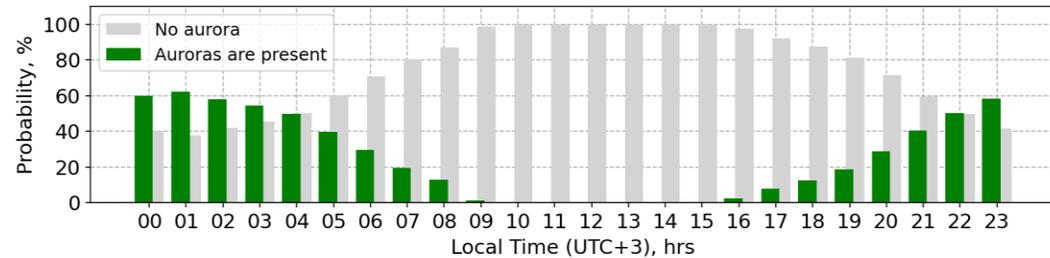
# ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ КАК ЕСТЕСТВЕННЫЙ ИНДИКАТОР СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ



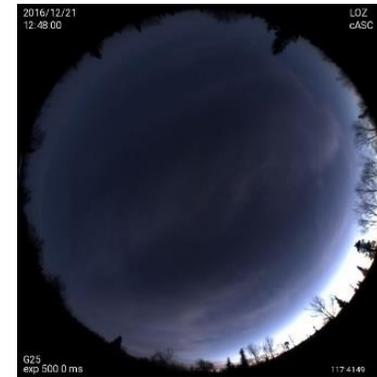
Наблюдение сияний 01.04.2022 г. посредством камеры всего неба обсерватории «Lovozero» (ГС LOZ) ПГИ;



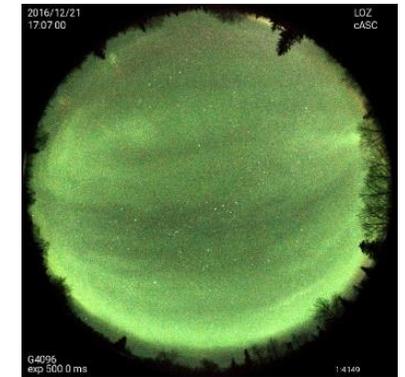
Сопоставление уровня ГИТ на станции VKH и области возникновения сияний в окрестности обсерватории LOZ (по состоянию на 14.12.2013 г)



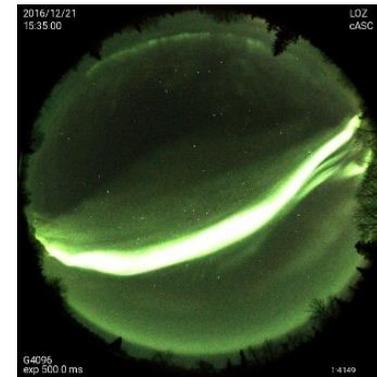
К вопросу о возможности диагностирования вероятности сбоев систем автоматики высокоширотных железных дорог на основе естественных индикаторов состояния космической погоды: а – Распределение аномалий работы сигнализации на Северной железной дороге относительно местного времени в периоды сильных магнитных бурь в 1989 и 2000–2005 гг. [Eroshenko et al., 2010]; б – Суточные вариации вероятности наблюдения сияний в окрестности станции LOZ.



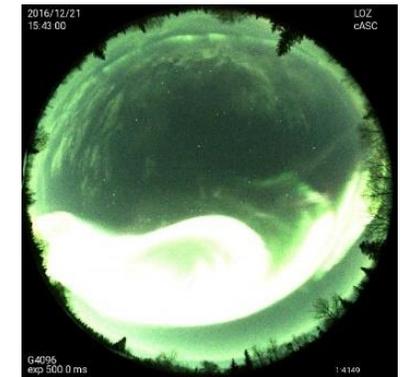
а



б



в

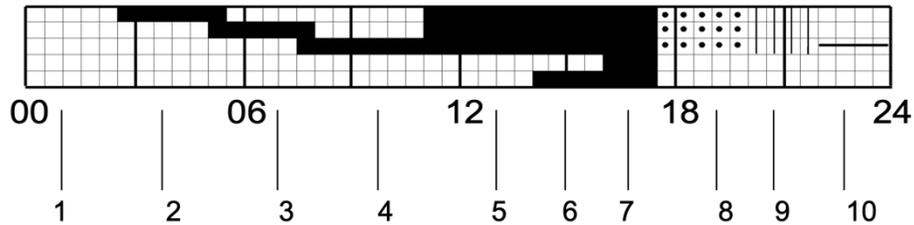


г

Состояние небосвода, зарегистрированное All-sky-камерой обсерватории LOZ в различное время суток 21 декабря 2016 г.: а – сияния отсутствуют; б – диффузные сияния; в – сияния типа «дуга»; г – сияния типа «вихрь».

Установлена корреляция уровня ГИТ со структурой сияний. По состоянию на 21.12.2016 г. для периодов отсутствия сияний (12:48 UT) среднeminутный уровень ГИТ составлял 0.1 А, для диффузных 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.

# ДАННЫЕ ОБ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

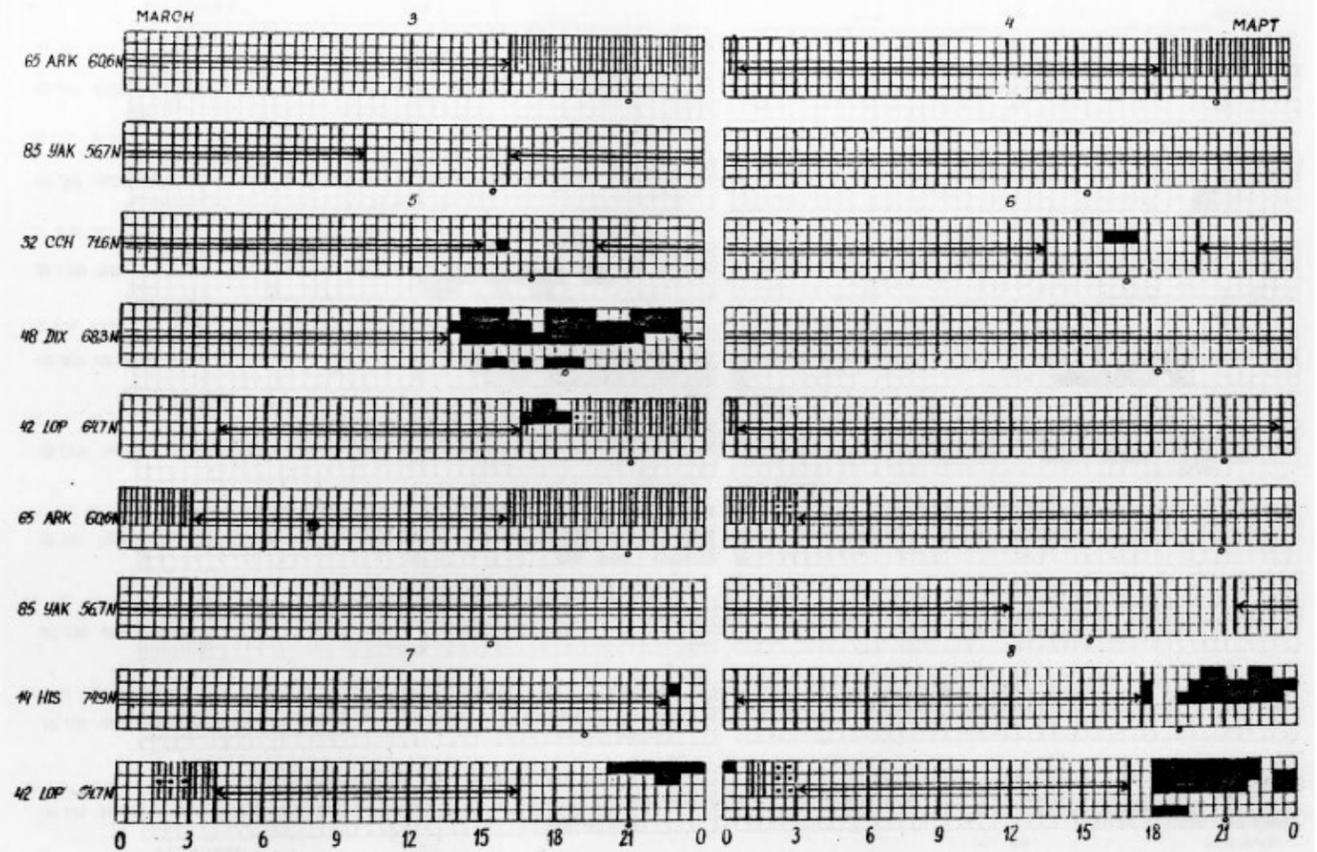


Представление результатов наблюдения сияний в виде аскапотов: 1 – сияние не наблюдаются; 2 – сияние наблюдается в северной области; 3 – сияние в зените; 4 – сияние на юге; 5 – сияние наблюдается в зените, северной и южной областях; 6 – в зените наблюдаются умеренное сияние, кроме этого свечение присутствует в северной и южной областях; 7 – в зените наблюдается сильное сияние, кроме этого свечение присутствует в северной и южной областях; 8 – частичная облачность; 9 – сплошная облачность; 10 – регистрация не проводилась.



DATE	TIME	North	Zenith	South	medium	strong
2012-01-26	00:00	1	1	0		
2012-01-26	00:30	1	1	0		
...	...	...	...	...	...	...
2012-01-26	04:30	1	1	0		
2012-01-26	05:00	x	x	x		
2012-01-26	05:30	x	x	x		
...	...	...	...	...	...	...
2012-01-26	23:30	1	1	0		

Оцифровано 1035 аскапотов



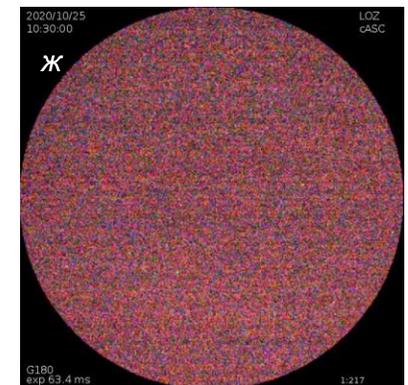
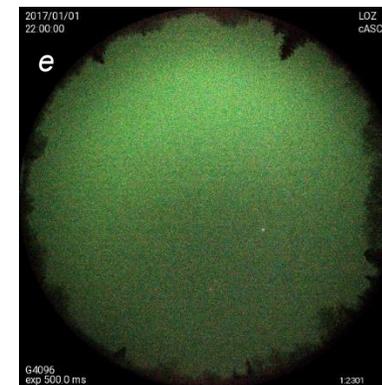
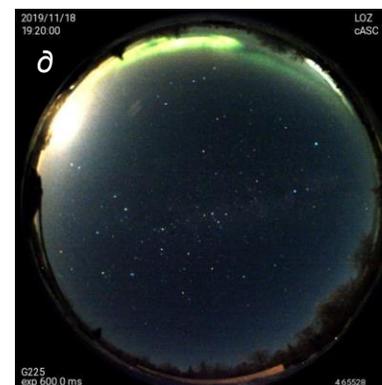
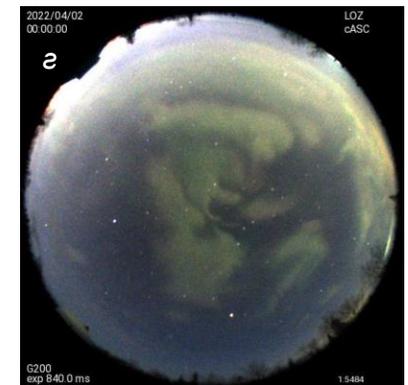
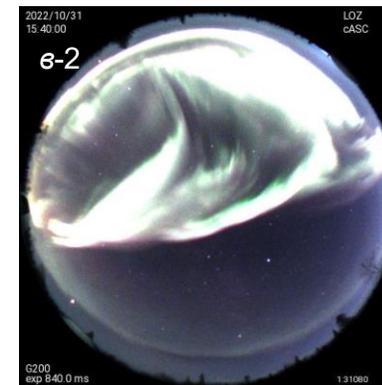
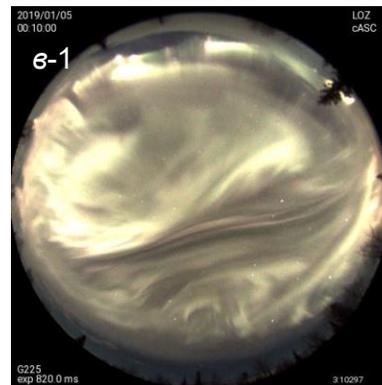
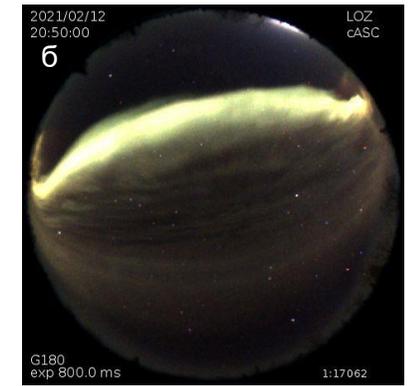
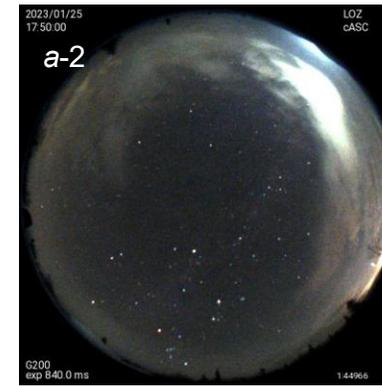
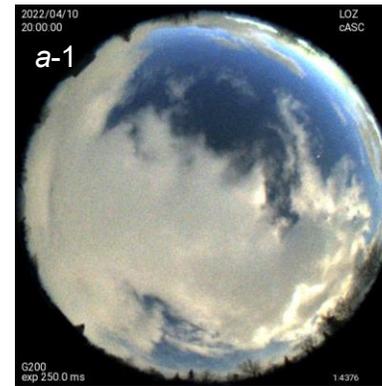
Точность машинного распознавания аскапотов  $\sim 1.0$ , (ни один из  $>100000$  результатов оцифровки не был ошибочным). Скорость машинной оцифровки аскапотов  $\sim 10$  аскапотов/сек (CPU: Intel Core I7-9700KF) [Воробьев и др., 2023].

Воробьев, А. В., Лапин, А. Н., & Воробьева, Г. Р. (2023). Программное обеспечение для автоматизированного распознавания и оцифровки архивных данных оптических наблюдений полярных сияний. Информатика и автоматизация, 22(5), 1177-1206. <https://doi.org/10.15622/ia.22.5.8>

# ДААННЫЕ О СТРУКТУРЕ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ. КЛАССИФИКАЦИЯ

## Классификация изображений с камеры всего неба

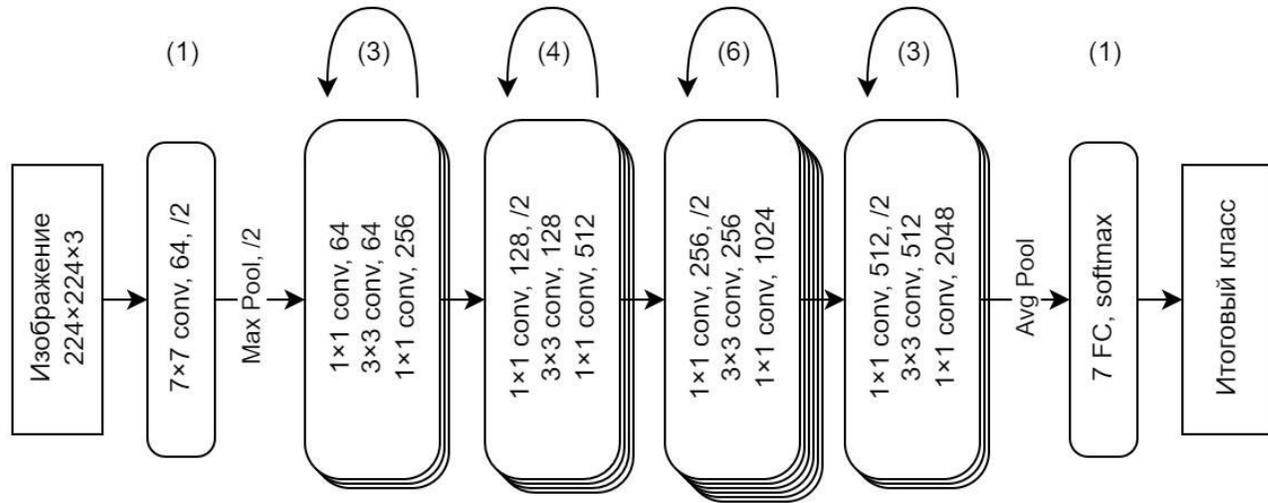
1. Чистое небо / сияние отсутствует (CNA от англ. Clear / No aurora)
2. Дискретное сияние (Discrete)
3. Дуговое сияние или дуга (Arc)
4. Диффузное сияние (Diffuse)
5. Сияния за горизонтом (Horizon)
6. Сияния и облачно (AC от англ. Aurora but Cloudy)
7. Дефектные изображения (Broken)



Характерные представители рассматриваемых классов изображений:  
а – чистое небо; б – дуга; в – дискретные сияния; з – диффузионные сияния;  
д – сияния за горизонтом; е – сияния и облачно; ж – дефектные изображения  
//изображения взяты с ресурса ПГИ <http://aurora.pgja.ru:8071/?p=2>. (обс. Ловозеро)

# ДААННЫЕ О СТРУКТУРЕ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ. МАШИННАЯ ОБРАБОТКА

Анализировались данные за 2015–2024 гг. 163899 изображений (~8 Гб)

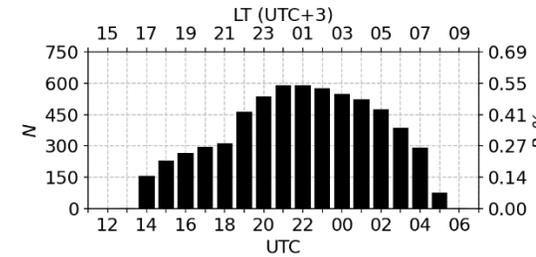
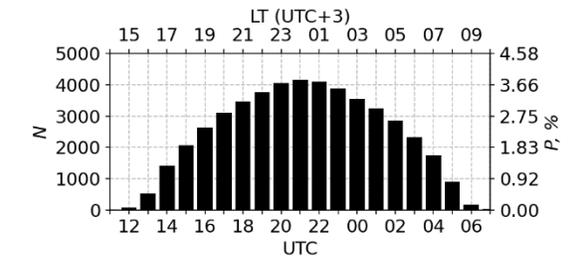
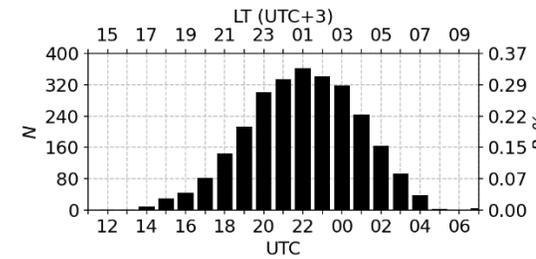
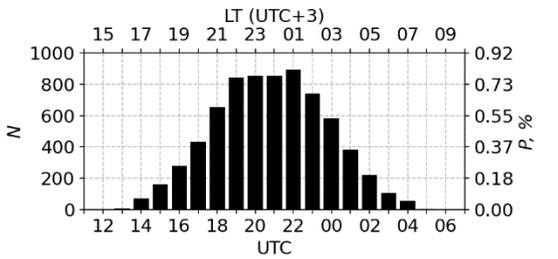
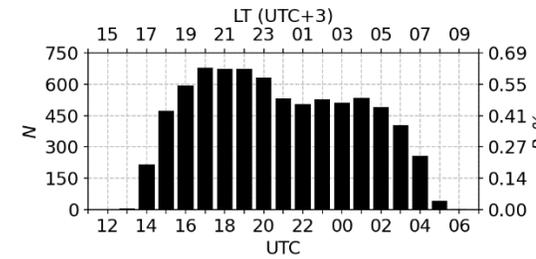


Архитектура ИНС ResNet50

Соотношение встречаемости изображений, принадлежащих различным классам, регистрируемых камерой обс. LOZ

Встречаемость	Класс						
	Чистое небо	Дискретные сияния	Дуга	Диффузное сияние	Сияние за горизонтом	Сияние и облачно	Дефектные изображения
N	51 278	1 201	3 078	2 806	5 908	24 560	4 159
P, %	55.1	1.3	3.3	3.0	6.4	26.4	4.5

Примечание: N – число событий данного класса; P – доля от общего числа событий.



Суточный ход встречаемости сияний различных классов:  
 (а)–сияние на горизонте;  
 (б)–дуга; (в)–дискретное сияние;  
 (з)–сияние и облачность;  
 (д)– диффузионные сияния.

Результат автоматической классификации изображений на основе предложенной системы доступен по ссылке:  
<https://disk.yandex.ru/i/76OMyWR4YyVYuw>.

# МЕТРИКИ КАЧЕСТВА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КЛАССИФИКАЦИИ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

$$Recall_w = \sum_{k=1}^K \frac{TP_k}{TP_k + FN_k} W_k; \quad (7)$$

$$Precision_w = \sum_{k=1}^K \frac{TP_k}{TP_k + FP_k} W_k; \quad (8)$$

$$F1_w = \sum_{k=1}^K \frac{2TP_k}{2TP_k + FN_k + FP_k} W_k; \quad (9)$$

где  $Recall_w$ ,  $Precision_w$  и  $F1_w$  – взвешенные метрики  $Recall$ ,  $Precision$  и  $F1$  соответственно;  $TP_k$ ,  $FP_k$ ,  $FN_k$ ,  $TN_k$  – истинно-положительные, ложноположительные, ложноотрицательные и истинно-отрицательные соответствующие элементы выборки относительно класса  $k$  [De Diego et al., 2022].

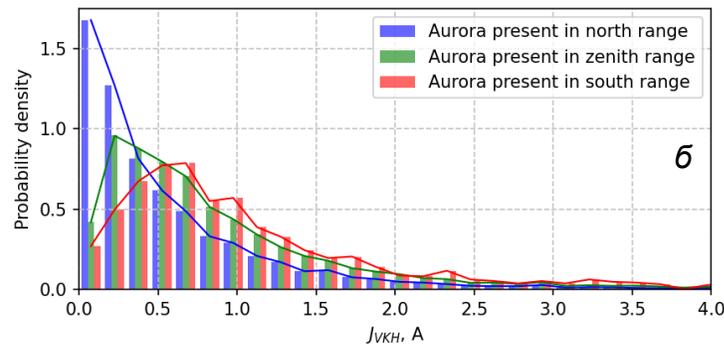
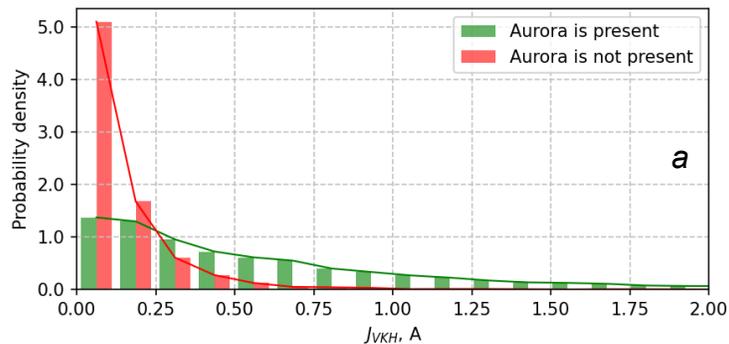
Класс	Метрика			
	Recall, %	Precision, %	F1, %	Число изображений
Сияния и облачно	93	98	96	4933
Дуговое сияние	93	85	89	589
Дефектные изображения	100	100	100	817
Диффузное сияние	75	94	83	548
Дискретное сияние	90	86	88	224
Чистое небо / нет сияний	99	96	98	10292
Сияния за горизонтом	92	95	94	1154
Общее взвешенное	96	96	96	18557
Общее макро-усредненное	92	93	92	18557

Вес  $k$ -го класса  $W_k$  определялся из соотношения числа размеченных изображений:

$$W_k = \frac{O_k}{\sum_{l=1}^K O_k}, \quad (10)$$

где  $O_k$  – число размеченных изображений.

# КОРРЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УРОВНЯ ГИТ ОТНОСИТЕЛЬНО ЛОКАЛИЗАЦИИ СИЯНИЙ



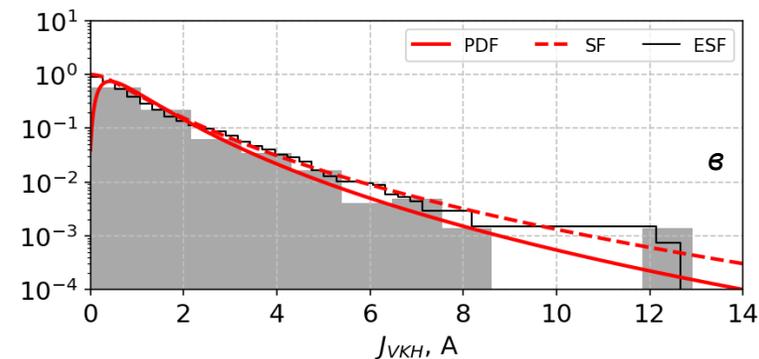
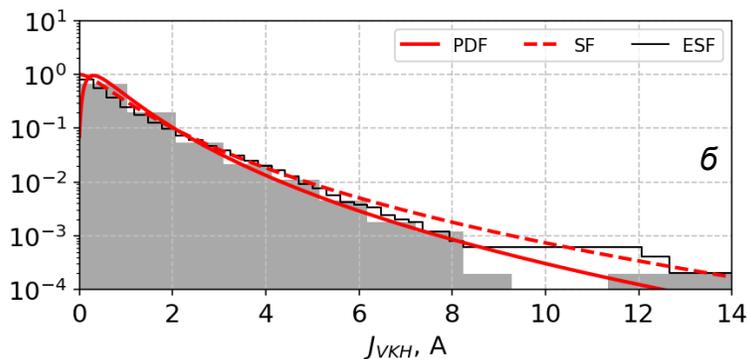
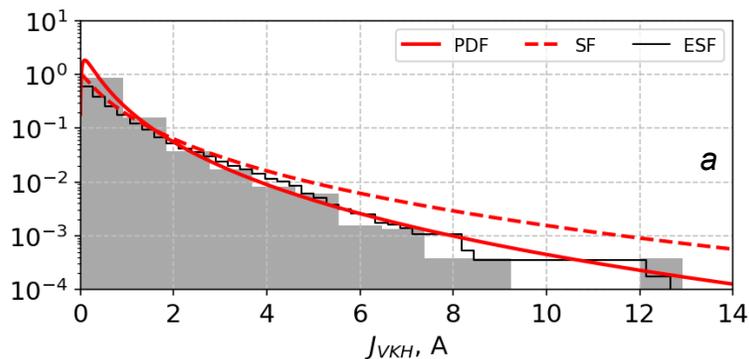
Гистограмма распределения плотности вероятности значений ГИТ при наличии/отсутствии полярных сияний (а) и при их дифференциации по областям небосвода (б). Ширина интервалов гистограммы в данном случае определяется согласно правилу:  $h_n = 3.49sn^{-1/3}$ , где  $n$  – размер выборки,  $s$  – среднее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

$$\text{PDF}(x, s) = \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\log^2 x}{2s^2}\right), \quad (11)$$

где  $s$  – параметр формы.

➤ При сияниях на севере вероятность того, что среднеполучасовой уровень ГИТ превысит, 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

➤ 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.



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

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕРОЯТНЫХ УРОВНЕЙ ГИТ

## Наивный Байесовский классификатор

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}, \quad (12)$$

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 (9).

$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(B|A_i)P(A_i), \quad (13)$$

где вероятности под знаком суммы известны или допускают экспериментальную оценку.

Тогда, в контексте решаемой задачи имеем:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B|A)P(A) + P(B|\sim A)P(\sim A)}, \quad (14)$$

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;  $P(B|A)$  – вероятность наблюдения сияний в заданной области при  $J_{\text{вкн}} \geq J_0$ ;  $P(A)$  и  $P(\sim A)$  – вероятности того, что  $J_{\text{вкн}} \geq J_0$  и  $J_{\text{вкн}} < J_0$  соответственно;  $P(B|\sim A)$  – вероятность наблюдения сияний в заданной области при  $J_{\text{вкн}} < J_0$ .

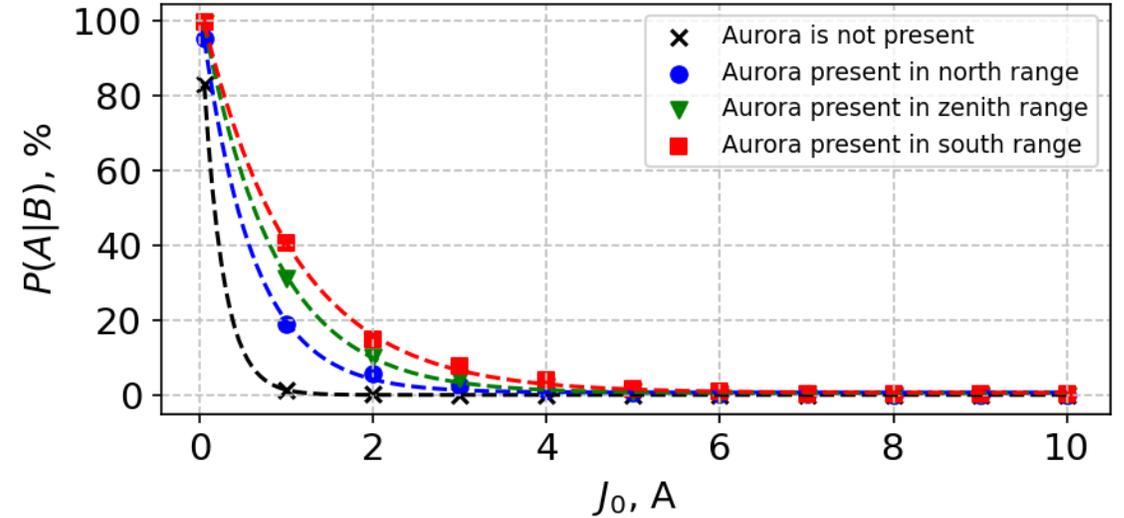
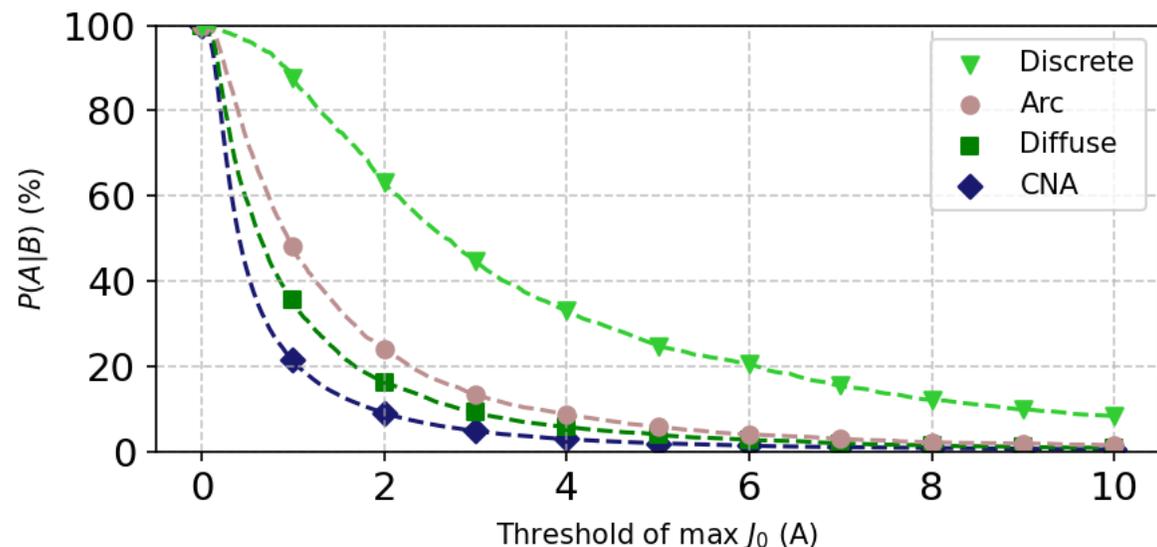


Рис. 12 – Характер зависимости апостериорной вероятности превышения уровня ГИТ определенного порога в отсутствие сияний (черный пунктир), а также при наблюдении сияний на севере (синяя пунктирная линия), в зените (зеленый пунктир) и на юге (красный пунктир).

$$P(A|B) \approx P(J_0) = a \cdot \exp(bJ_0) + c, \quad (15)$$

где  $X$  – признаковая переменная;  $a$ ,  $b$  и  $c$  – соответствующие ей параметры формы:  $a = 102.87$  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.

# КОРРЕЛЯЦИОННО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УРОВНЯ ГИТ ОТНОСИТЕЛЬНО СТРУКТУРЫ СИЯНИЙ



В период наблюдения дискретных сияний вероятность того, что максимальное значение ГИТ преодолет отметку в 10 А составляет 8,26 %, что в 5.5 раз выше, чем при наблюдении дуговых сияний, в 10 раз выше чем при диффузионных, и в 18 раз выше, чем при отсутствии сияний как таковых.

Вероятный уровень ГИТ относительно наблюдаемой структуры полярных сияний

Класс сияний	Discrete		Arc		Diffuse		CNA	
	$J_0$ , А	Mean $J_{VKH}$ , %	$J_0$ , А	Mean $J_{VKH}$ , %	$J_0$ , А	Mean $J_{VKH}$ , %	$J_0$ , А	Mean $J_{VKH}$ , %
$J_0$ , А	2	10	2	10	2	10	2	10
Mean $J_{VKH}$ , %	18,43	0,26	4,03	0,04	2,59	0,02	1,35	0,09
Max $J_{VKH}$ , %	63,19	8,26	24,14	1,50	16,26	0,81	9,06	0,46

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Показано, что информация о локализации и визуальной структуре полярных сияний обладает признаками больших данных (объем, скорость, разнообразие) и может быть использована для оценки уровня воздействия космической погоды на энергетические системы арктического региона.
- Разработана система автоматической классификации изображений, обеспечивающая идентификацию структуры сияний со средней точностью ~ 96 %.
- Установлено, что при сияниях на севере вероятность того, что среднеполучасовой уровень ГИТ превысит, 2 А, составляет ~6 %, в то время как при наблюдении сияний в зените и на юге вероятность превышения ГИТ аналогичного уровня составляет ~10 % и ~15 % соответственно
- Установлено, 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.
- Показано, что в периоды диффузных сияний или в отсутствие сияний как таковых, ГИТ с вероятностью 50 % не превышает 0.72 и 0.41 А соответственно. Во время дуговых сияний JVKN с вероятностью 50 % преодолевает порог 0.98 А. При дискретных сияниях с той же вероятностью JVKN > 2.58 А.
- Сформулировано и обосновано предположение, что в периоды наблюдения диффузных сияний, а также в отсутствие сияний как таковых вероятность возникновения экстремальных значений ГИТ, способных спровоцировать серьезные последствия крайне мала. Выдвинута гипотеза о том, что ГИТ нелинейно связаны с уровнем ГМА и резко зависят от месторасположения объекта воздействия относительно границ аврорального овала.

## Благодарности

Автор исследования выражает 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 VKN.

## ЛИТЕРАТУРА

- Vorobev, A.V., Soloviev, A.A., Pilipenko, V.A., & Vorobeva, G.R. (2023). Internet Application for Interactive Visualization of Geophysical and Space Data: Approach, Architecture, Technologies. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(4), 151-160. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.350281.1007467>
- Vorobev AV, Vorobeva GR. An approach to detecting and eliminating spatial contour artifacts in Web GIS applications. *Computer Optics* 2023; 47(1): 126-136. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1127.
- Vorobev, A.; Soloviev, A.; Pilipenko, V.; Vorobeva, G.; Sakharov, Y. An Approach to Diagnostics of Geomagnetically Induced Currents Based on Ground Magnetometers Data. *Appl. Sci.* 2022, 12, 1522. <https://doi.org/10.3390/app12031522>
- Interactive Computer model for aurora forecast and analysis / A. V. Vorobev, A. A. Soloviev, V. A. Pilipenko, G. R. Vorobeva // *Solar-Terrestrial Physics*. – 2022. – Vol. 8. – No 2. – P. 84-90. – DOI 10.12737/stp-82202213.
- Vorobev A.V., Vorobeva G.R., Khristodulo O.I. An information system for spatial visualization of prognostic and retrospective data on the probability of observing auroras. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 225–233 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-225-233
- Vorobev A. V., Pilipenko V. A. Geomagnetic data recovery approach based on the concept of digital twins // *Solar-Terrestrial Physics*. 2021. no. 2. pp. 48-56. DOI: <https://doi.org/10.12737/stp-72202105> .
- A. V. Vorobev, V. A. Pilipenko, T. A. Enikeev, G. R. Vorobeva, O.I. Khristodulo. System for dynamic visualization of geomagnetic disturbances according to the data of ground magnetic stations (2021). *Scientific Visualization* 13.1: 162 - 176, DOI: 10.26583/sv.13.1.11
- Vorobev, A. V. The use of digital twins in industry decision support systems in the processing of geophysical information / A. V. Vorobev, O. I. Khristodulo // *Prospects of Science*. - 2021. - No. 4 (139). - p. 183-186.
- Vorobev A.V., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Vorobeva G.R., Gainetdinova A.A., Lapin A.N., Belakhovsky V.B., Roldugin A.V. Local diagnostics of aurora presence based on intelligent analysis of geo- magnetic data. *Solar-Terrestrial Physics*. 2023. Vol. 9. Iss. 2. P. 22–30. DOI: 10.12737/stp-92202303.
- Vorobev, A. V. Algorithm for machine search and automated statistical analysis of irregular geomagnetic pulsations at high latitudes / A. V. Vorobev, V. A. Pilipenko, M. J. Engebretson // *Issues of theory and practice of geological interpretation of geophysical fields: Proceedings of the 47th session International Scientific Seminar of D. G. Uspensky - V. N. Strakhova, Voronezh, January 27–30, 2020.* - Voronezh: Publishing and Printing Center "Scientific Book", 2020. - P. 72-76.
- Vorobev, A.V., Pilipenko, V.A., Sakharov, Y.A., Selivanov, V.N. (2020). Statistical Properties of the Geomagnetic Field Variations and Geomagnetically Induced Currents. In: Yanovskaya, T., Kosterov, A., Bobrov, N., Divin, A., Saraev, A., Zolotova, N. (eds) *Problems of Geocosmos–2018*. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_5)
- Vorobev, A. V. Reservation methods in problems of geomagnetic data time series recovery / A. V. Vorobev, G. R. Vorobeva // *Information processes*. - 2018. - T. 18. - No. 1. - p. 1-18.
- 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. *Adv. Space Res.* 2010, vol. 46, iss. 9, pp. 1102–1110. DOI: 10.1016/j.asr.2010.05.017.