



РНФ
Российский
научный фонд



The 8th International Conference on Deep Learning in Computational Physics
(DLCP2024)

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ В ВЫСОКОШИРОТНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

ВОРОБЬЕВ Андрей Владимирович^{1,2}

¹ФГБУН Геофизический центр РАН,
²ФГБОУ ВО Уфимский университет науки и технологий,

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

19 - 21 июня 2024 г.,
г. Москва



ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ, КАК ЗНАЧИМЫЙ ФАКТОР НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Геомагнитное поле (ГМП), нТл:

$$B_{\text{ГМП}} = B_1 + \delta B = (B_0 + B_a) + \delta B, \quad (1)$$

где B_1 – ГМП внутриземных источников; B_0 – главное поле (ГОСТ 25645.126-85); B_a – поле земной коры, являющееся полем магнетизма горных пород; δB – поле геомагнитных вариаций.

$$\delta B = S + L + DP + DR + DCF + DT, \quad (2)$$

где S – регулярная часть поля, возникающая из-за волнового излучения Солнца (ее статистическая аналогия – S_q -вариация: токовая система, развивающаяся на освещенной стороне Земли); L – регулярная часть поля, возникающая из-за лунных приливов в верхней атмосфере, статистически выделяемая методом наложения этих эпох по возможно большему периоду наблюдения; DP – нерегулярная часть поля, возникающая из-за корпускулярного излучения Солнца (ее статистическая аналогия – S_q -вариация: токи развиваются в виде электроструй в зоне полярных сияний); DR – поле кольцевого тока, существенно усиливающегося в период магнитных бурь планетарного масштаба, его аналогия – главная фаза в D_{st} -вариации: токи развиваются во внешней части радиационных поясов Земли; DCF – нерегулярная часть поля, возникающая из-за токов на поверхности магнитосферы при обтекании ее солнечным ветром (ее статистическая аналогия – начальная фаза D_{st} -вариации); DT – поле токов хвоста магнитосферы, определяемое движением плазмы, статистической аналогии не имеет и является наименее изученной составляющей вариаций ГМП [1].

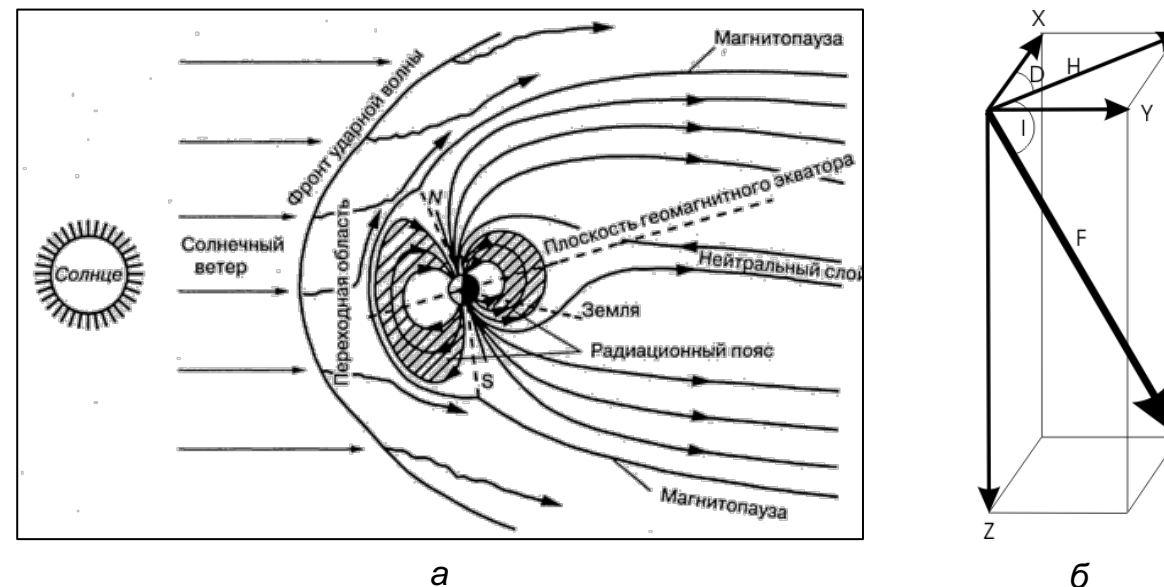


Рис. 1. Схематическое изображение структуры магнитосферы Земли (а) и составляющие вектора ГМП, регистрируемые на поверхности Земли (б)

Регистрируемые на поверхности Земли параметры ГМП:

$$F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2; H^2 = X^2 + Y^2; D = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right); I = \arcsin\left(\frac{Z}{F}\right) = \arctg\left(\frac{Z}{H}\right), \quad (3)$$

где X , Y и Z – северная, восточная и вертикальная составляющие вектора ГМП, нТл; H – горизонтальная составляющая, нТл; F – полный вектор, нТл; D – магнитное склонение, определяемое как угол между истинным севером (географическим севером) и магнитным севером (горизонтальной составляющей поля), град. I – магнитное наклонение, определяемое как угол, измеренный от горизонтальной плоскости к вектору магнитного поля, град.

Вклад каждого из перечисленных в выражении (1) слагаемых существенно зависит от времени суток, сезона, географической и геомагнитной широт наблюдения, а также от состояния околоземного космического пространства. Однако можно сказать, что составляющие S , DP и DR являются основными.

НЕКОТОРЫЕ 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]



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



ЭФФЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ (СИСТЕМЫ) ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ



а



б



в



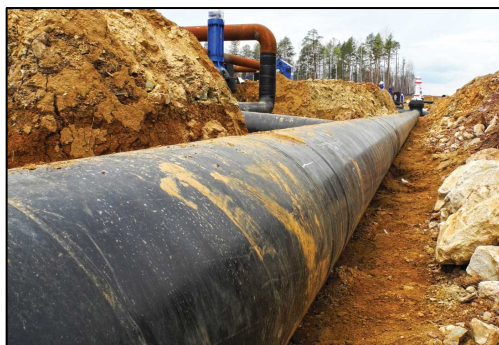
г



д



е



ж

Рис. 2. Технические объекты и системы – цели ГМА: а) подвижные составы и системы сигнальной автоматики высокоширотных железных дорог; б) разрушение силового трансформатора компании «Electric and Gas Company» (США) вследствие ГИТ, вызванных ГМА 13-14 марта 1989 г.; в, г) системы навигации и КВ-радиосвязи подвижных объектов, эксплуатируемых в АЗРФ д) системы геомагнитного сопровождения наклонно-направленного бурения нефтяных и газовых скважин в АЗРФ; е) демпфирование угловой скорости ИСЗ и спутниковые аномалии (на рис. показана национальная орбитальная станция США SKYLAB, потерпевшая крушение в результате возросшей солнечной активности в июле 1979 г. ж) снижение долговечности магистральных трубопроводов, вследствие увеличения скорости их коррозии

Sydney Today 20 ° / 29 ° news.com.au Sign Up Log In

National World Lifestyle Travel Entertainment Technology Finance Sport More

Technology > Innovation > Military

GPS signals jammed: Norway, Finland warn pilots Russia may blind their navigation systems

The GPS worrying Jamie Se 4 min re

Norway, Finland suspect Russia of jamming GPS

November 12, 2018 - By GPS World Staff

<https://www.gpsworld.com/norway-finland-suspect-russia-of-jamming-gps/>

- Согласно отчету «Zurich Insurance Group»¹ страховые выплаты в США в результате сбоев электрооборудования в следствие магнитных бурь с 2005 по 2015 гг. превысили \$ 1.9 млрд [Dobbins R.W., Schriever K., 2015].
- В феврале 2022 г. в следствие магнитной бури компания SpaceX потеряла 40 из 49 спутников Starlink выведенных на орбиту 03.02.2022 г. и временно находившихся на низкой околоземной орбите ~209 км [https://time.com/6146986/space-x-satellites-solar-storm/].

ПОДХОД К ДИАГНОСТИКОВАНИЮ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА БАЗЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Табл. 4 Корреляция значений |JVКН| 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

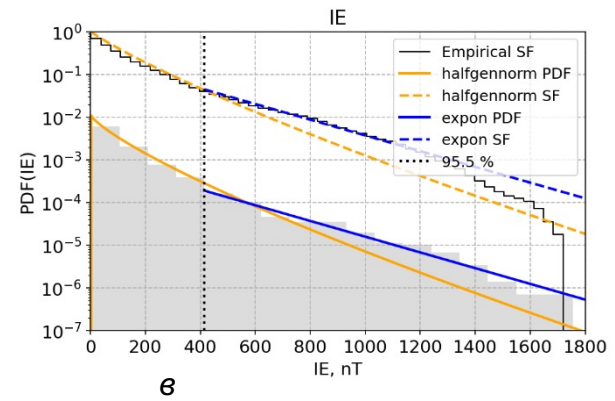
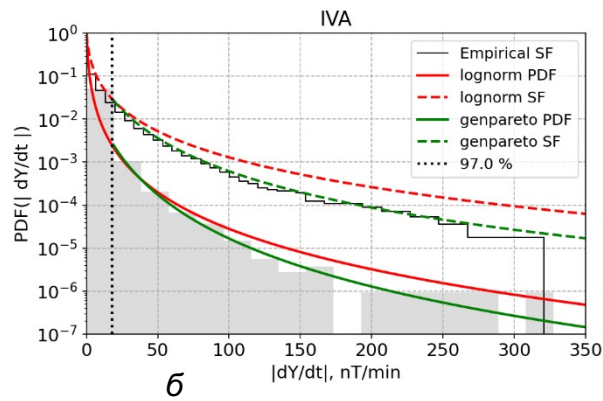
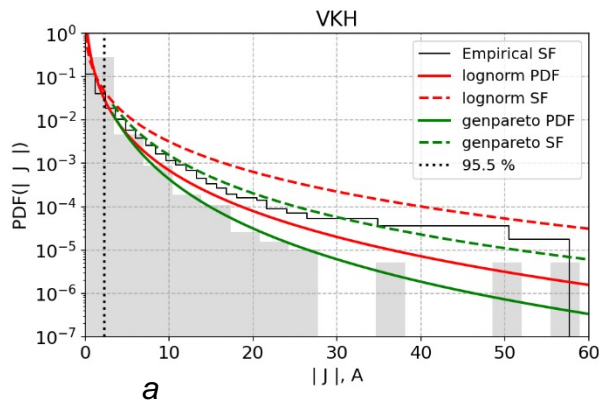
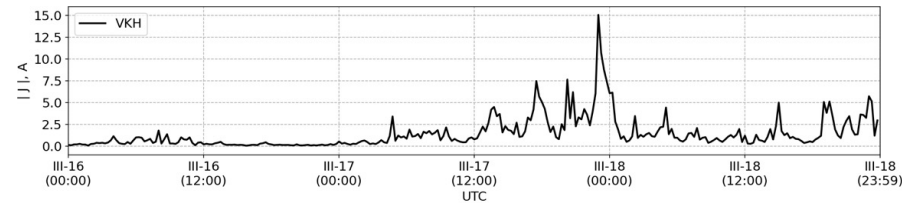
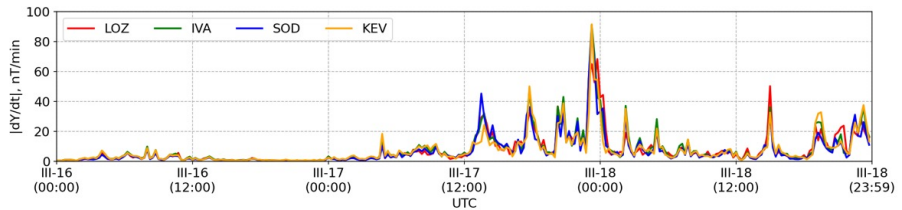


Рис. 5. Анализ однородности информации в процессе формирования информационной среды многоуровневой системы ЦД: а – геоиндуцированные токи на трансформаторной станция VKH; б и в – вариабельность восточной составляющей и проксителлурическое поле на станции IVA; IE-индекс ГМА

Рис. 3 Вариации значений целевой функции и признаков переменных

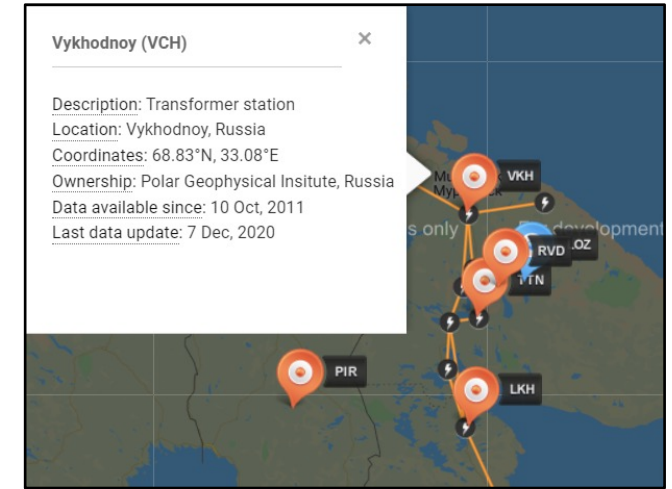


Рис. 4. Структура многоуровневой системы цифровых двойников (а) и география ее физических прототипов (б)

ВАЛИДАЦИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГИТ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОГО ПОДХОДА И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Оценка коэффициента детерминации R^2 показала, что в рамках решаемой задачи 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 (45), искомая модель будет иметь вид выражения (57).

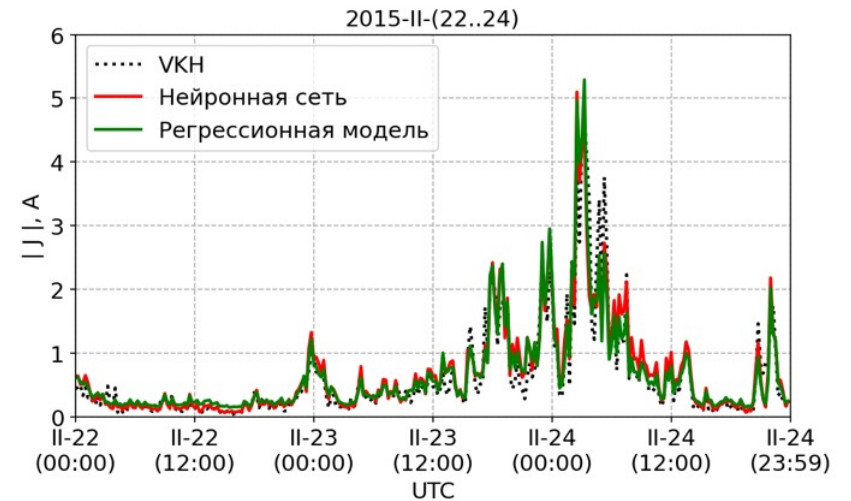
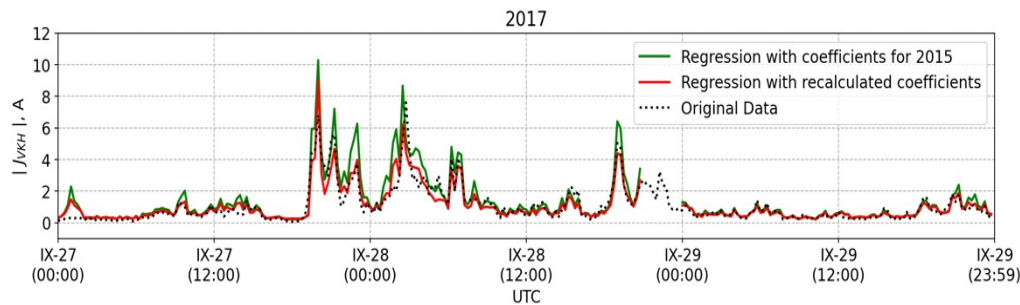
$$f(x, \beta) = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k = \sum_{j=1}^k \beta_j x_j = x^T \beta, \tag{4}$$

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.

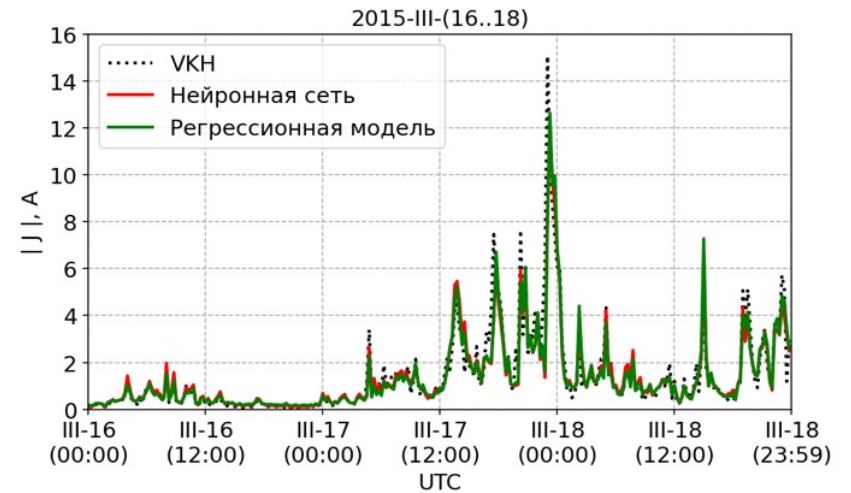
$$|J_{VKH}| = \beta_0 + \beta_1 \left| \frac{dY_{LOZ}}{dt} \right| + \beta_2 \left| \frac{dY_{IVA}}{dt} \right| + \beta_3 \left| \frac{dY_{KEV}}{dt} \right| + \beta_4 IE, \tag{5}$$

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)



а

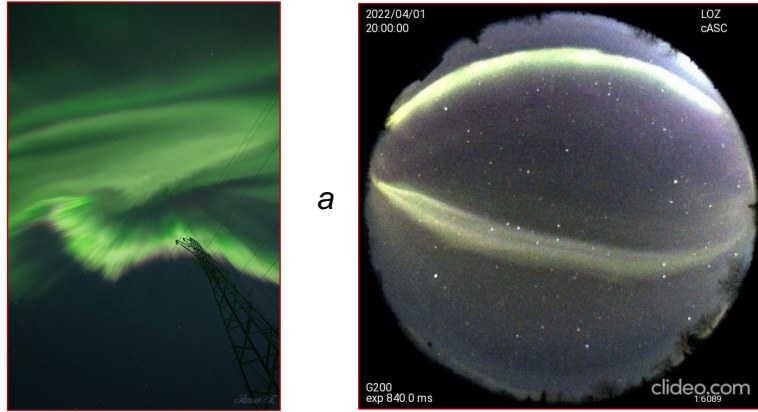


б

Рис. 6. Верификация данных с выхода ЦД ТС «VYKODNOY» (VKH) и его физического прототипа

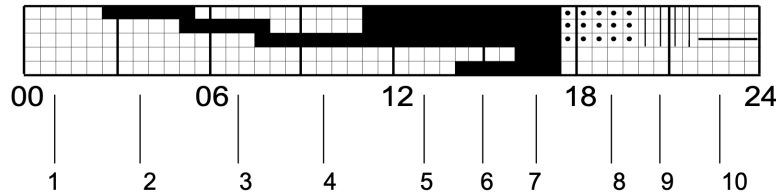
МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ КАК ВИЗУАЛЬНОГО ИНДИКАТОРА СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ⁶

Актуальные методы наземного оптического мониторинга полярных сияний

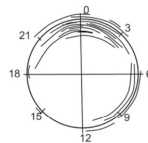
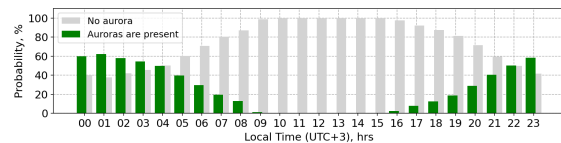


а

б



в



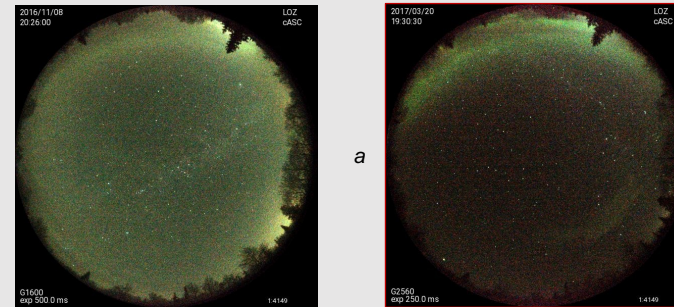
г

Оценка эффективности подхода к оптическому мониторингу полярных сияний на основе All-Sky-камер (на примере ГС LOZ за 2012-2020 гг.)

Табл. 1. – Оценка данных наблюдения полярных сияний All-Sky- камерой ГС LOZ

Область наблюдения	Сияние наблюдалось		Сияние не наблюдалось		Всего эффективных наблюдений ¹	
	Ед.	Доля, [%]	Ед.	Доля, [%]	Ед.	Доля, [%]
Север	4431	2.81	3789	2.40	8220	5.21
Зенит	4415	2.80	6440	4.08	10855	6.88
Юг	1022	0.65	6598	4.18	7620	4.83

Примечание: ¹ Наблюдений, проводимых при надлежащей засветке и в отсутствие облачности; Процентная доля значений рассчитана относительно периода наблюдений, включающего 157824 30-мин интервала.



а

б

Рис. 3. Фактически 2016-11-08 20:30 UT и 2017-03-20 19:30 UT сияния наблюдались севернее ГС LOZ, однако, согласно отчетам ПГИ (http://pgia.ru/content/site/pages/PGI-DATA/PGIdata_2016-4.pdf, http://pgia.ru/content/site/pages/PGI-DATA/PGIdata_2017-1.pdf) сияния зарегистрированы в зените.

- 19127 30-мин интервалов времени (суммарно ~400 суток) в течение которых регистрация полярных сияний в зените относительно ГС LOZ невозможна из-за частичной или полной облачности.
- Из 10855 случаев сияний, зарегистрированных в зените относительно ГС LOZ за 2012-2020 гг (Табл. 1) в следствие человеческого фактора идентифицировано не менее 1 % ошибок (Рис. 3).

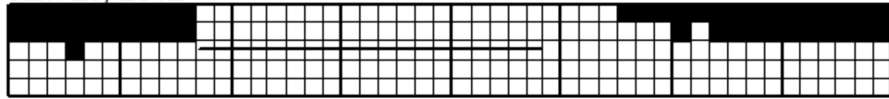
Проблема: общая эффективность подхода составляет несколько процентов, а устаревшая форма представления результатов исключает возможность их автоматизированной обработки, верификации и анализа.

Вопрос: Как по геомагнитным данным оценить локальную вероятность существования полярных сияний?

Рис. 7. Оптическая регистрация полярных сияний: **а** – любительская съемка сияний с 27 на 28 декабря 2022 г. недалеко от р. Лавны (Россия, Мурманская область); **б** – наблюдение полярных сияний 01.04.2022 г. посредством фоторегистратора небосвода (All-Sky-камеры) на геофизической станции «Lovozero» (ГС LOZ) Полярного геофизического института; **в** – представление результатов наблюдения сияний в виде аскаплотов: 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.

Машинное зрение в задачах оцифровки аскапотов

Jan. 26, 2012



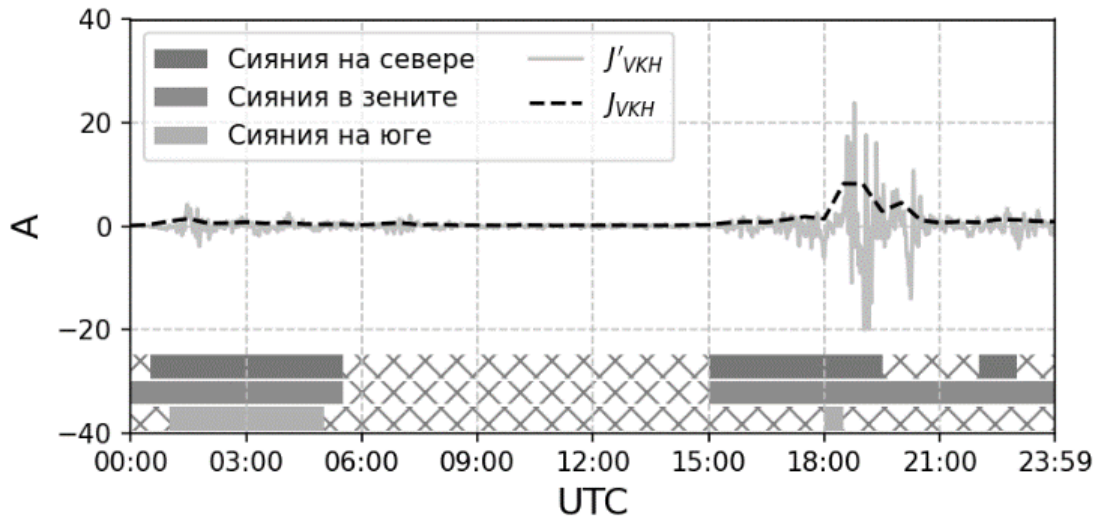
DATE	TIME	North	Zenith	South	medium	strong
2012-01-26	00:00	1	1	0		
2012-01-26	00:30	1	1	0		
2012-01-26	01:00	1	1	0		
2012-01-26	01:30	1	1	1		
2012-01-26	02:00	1	1	0		
2012-01-26	02:30	1	1	0		
2012-01-26	03:00	1	1	0		
2012-01-26	03:30	1	1	0		
2012-01-26	04:00	1	1	0		
2012-01-26	04:30	1	1	0		
2012-01-26	05:00	x	x	x		
2012-01-26	05:30	x	x	x		
...
2012-01-26	22:30	1	1	0		
2012-01-26	23:00	1	1	0		
2012-01-26	23:30	1	1	0		

Оцифровано 1035 аскапотов



Данные о сияниях в окрестности обсерватории LOZ 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° N, 35.02° E (с. Ловозеро, Мурманская область, Россия) и 68.83° N, 33.08° E (трансформаторная подстанция «Выходной» (VKH), Мурманская область, Россия).

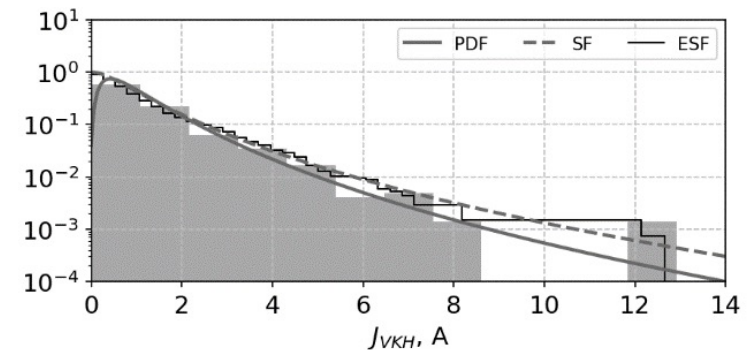
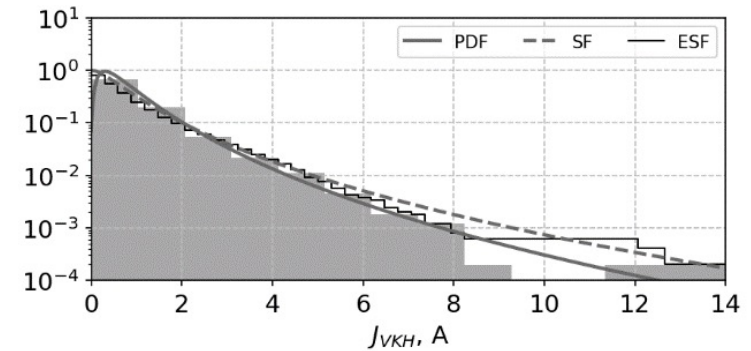
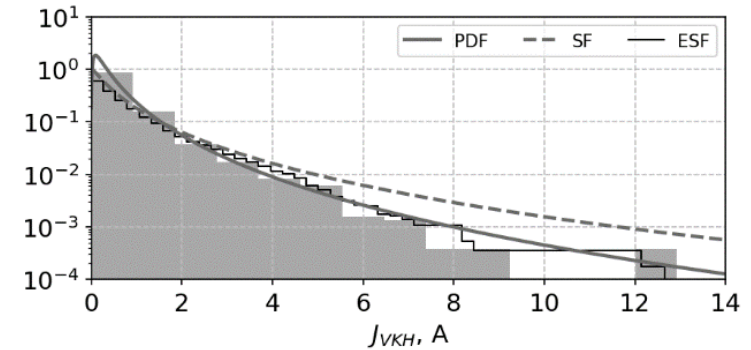
$$J_{VKHn} = \frac{1}{N} \sum_{m=n}^{n+\Delta t_1/\Delta t_2} |J'_{VKH}|_m,$$

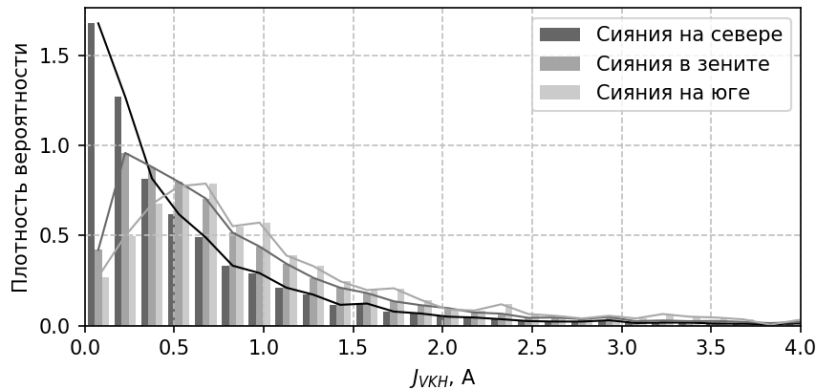
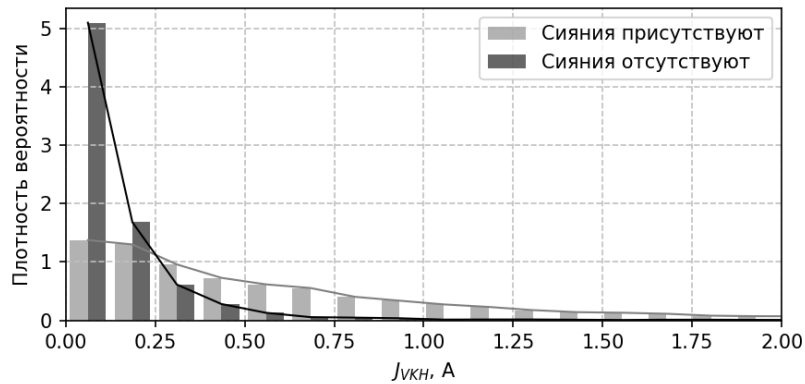


Сопоставление уровня ГИТ на станции VKH и области наблюдения полярных сияний в окрестности обсерватории LOZ по состоянию на 14.12.2013 г.

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).

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





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: $h_n = 3.49sn^{-1/3}$,

Наиболее вероятный уровень J_{VKH} при наблюдении сияний на севере, в зените и на юге составляет 0.08 А, 0.23 А, и 0.68 А соответственно, что объясняется расширением аврорального овала в периоды сильной ГМА и предоставляет возможность судить о вероятном уровне индуцированных в высокоширотных ЛЭП токов, как функции от области проявления полярных сияний.

При наблюдении сияний на севере вероятность того, что среднеполучасовой уровень ГИТ превысит, например, 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. 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.

Наивный Байесовский классификатор

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

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 (7).

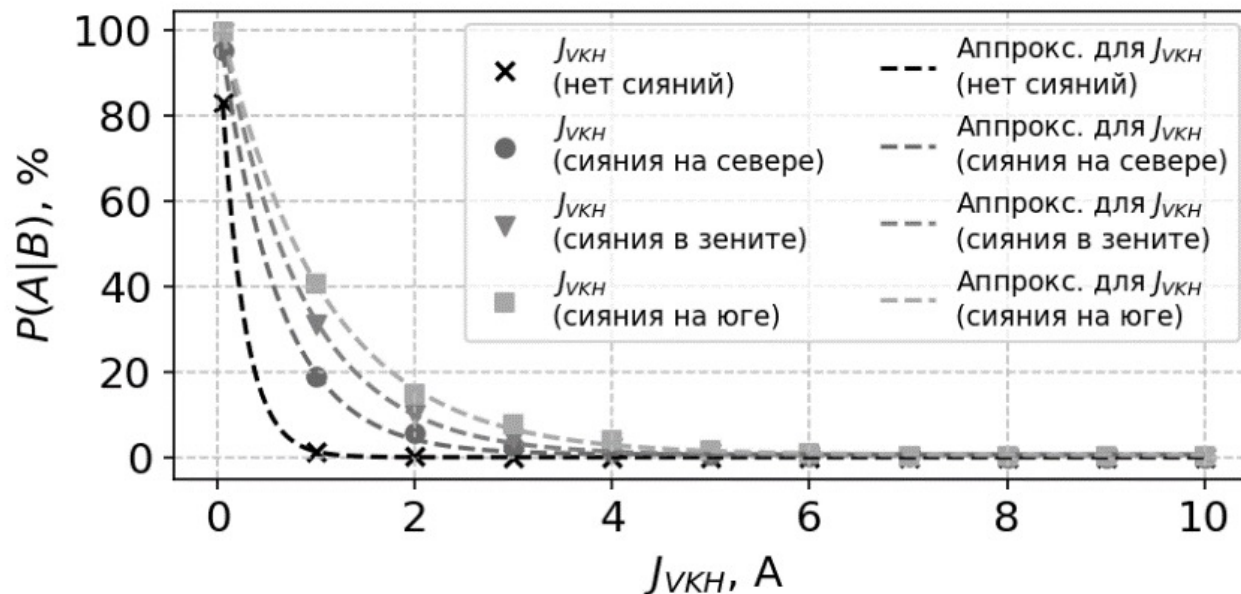
$$P(B) = \sum_{i=1}^N P(B|A_i)P(A_i), \quad (7)$$

где вероятности под знаком суммы известны или допускают экспериментальную оценку.

Тогда, в контексте решаемой задачи имеем:

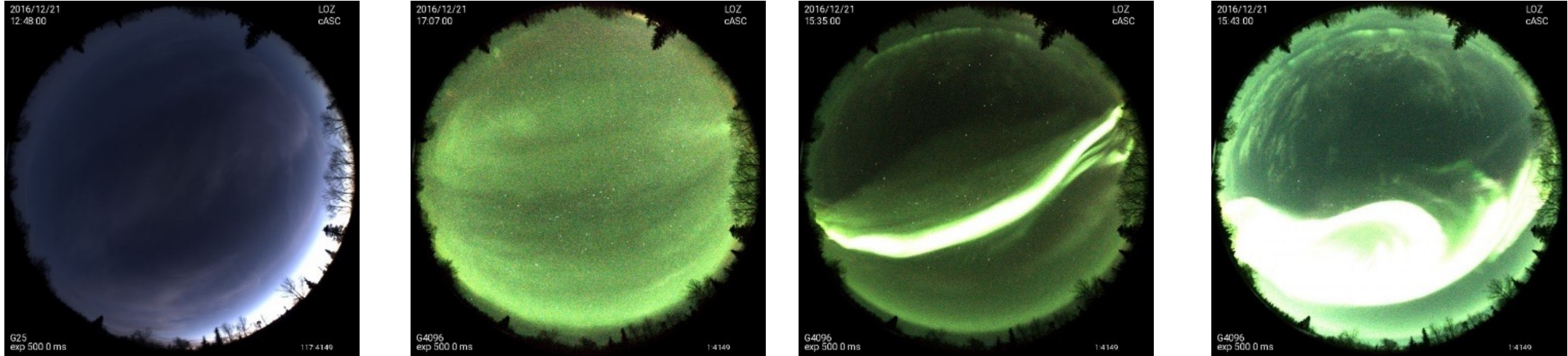
$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B|A)P(A) + P(B|\sim A)P(\sim A)}, \quad (8)$$

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 $J_{\text{ВКН}} < J_0$.



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

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.



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

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) среднееминутный 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.

- 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
- 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.