



УДК 550.387

РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО ГЕОМАГНИТНОГО ИНДЕКСА K_{kos} ПО ДАННЫМ МАГНИТОМЕТРА ФМ СПУТНИКА «ЭЛЕКТРО-Л» №4

А. Д. Шклярук¹, Д. А. Арутюнян¹, А. А. Брагина¹¹Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия

В работе представлена новая методика расчета индекса геомагнитной активности K_{kos} по данным измерений магнитного поля с борта геостационарного спутника «Электро-Л» №4. В отличие от традиционных наземных индексов, основанных на горизонтальной компоненте поля, в качестве базового параметра использована высокочастотная составляющая компоненты B_z в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат (GSM). На основе совместного анализа с эталонным наземным K_p -индексом (GFZ) за апрель-сентябрь 2023 года разработана эмпирическая шкала перевода, позволяющая квантифицировать уровень возмущенности магнитосферы. Проведенная валидация показала хорошую корреляцию (коэффициент корреляции 0.65) между K_{kos} и K_p , особенно в периоды сильных бурь ($K_p > 3$). Предложенный метод открывает перспективы для оперативного мониторинга космической погоды с использованием космических аппаратов и дополнения существующих наземных сетей. В статье также обсуждаются основные источники погрешностей и направления для дальнейшего совершенствования алгоритма.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕОМАГНИТНАЯ АКТИВНОСТЬ, КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА, ИНДЕКС K_p , СПУТНИК «ЭЛЕКТРО-Л», МАГНИТОМЕТР, ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ, B_z -КОМПОНЕНТА, ВАЛИДАЦИЯ.

EDN: EDERBW

1. ВВЕДЕНИЕ

Геомагнитная активность, являющаяся проявлением взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли, оказывает непосредственное влияние на функционирование технологических систем, включая энергетические сети, спутниковую навигацию и связь [Tsurutani et al., 2003; Pulkkinen, 2007]. Для её количественной оценки в мировой практике исторически сложилась система геомагнитных индексов, рассчитываемых по данным глобальной сети наземных обсерваторий. Наиболее широко применяемым из них является планетарный трехчасовой K_p -индекс, который характеризует уровень возмущенности магнитного поля на основе вариаций его горизонтальной компоненты [Matzka & Stolle, 2021].

Несмотря на свою устоявшуюся роль, наземный мониторинг обладает рядом ограничений. К ним относятся неравномерное распределение обсерваторий, их концентрация в Северном полушарии и неспособность напрямую детектировать возмущения в удалённых областях магнитосферы, где многие процессы космической погоды инициируются и развиваются. В этой связи данные измерений магнитного поля с борта космических аппаратов (КА) представляют собой ценный источник

Электронная почта авторов для переписки:

Шклярук Алексей Дмитриевич, e-mail: shklyaruk@ipg.geospace.ru

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

информации, позволяющий получить глобальную и оперативную картину состояния околоземного пространства [Shprit et al., 2019].

Перспективным источником таких данных являются геостационарные спутники серии «Электро-Л», которые несут на борту комплексы научной аппаратуры для мониторинга окружающей среды. В частности, на КА «Электро-Л» №4 (рис. 1) установлен трёхкомпонентный феррозондовый магнитометр ФМ, обеспечивающий непрерывный поток данных о векторе магнитного поля с привязкой ко времени. Однако обработка спутниковых магнитометрических данных имеет существенную специфику. В отличие от наземных измерений, на них накладываются инструментальные шумы, эффекты периодической перекалибровки прибора и орбитальные вариации, что приводит к скачкообразным изменениям среднего уровня сигнала и делает прямое применение стандартных алгоритмов расчёта индексов невозможным.



Рис. 1. КА «Электро-Л» №4

Таким образом, актуальной задачей является разработка специализированных методов обработки спутниковых магнитометрических данных, позволяющих выделять сигнал, связанный именно с геомагнитной активностью, и на его основе создавать новые, космические индексы.

Целью данной работы является разработка, апробация и валидация методики расчёта нового индекса геомагнитной активности $Kkos$ по данным магнитометра ФМ спутника «Электро-Л» №4.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Исходные данные представляют собой результаты измерений трёхкомпонентного феррозондового магнитометра (ФМ), установленного на борту космического аппарата (КА) «Электро-Л» №4. Данные поступают с привязкой ко времени и содержат следующую информацию: год (YYYY), месяц (MM), день (DD), часы (hh) и минуты (mm) с начала отсчёта дня, номер полукомплекта прибора (p), а также компоненты вектора магнитной индукции: B_x , B_y и B_z (рис. 2).

Файл	Изменить	Просмотр						
YYYY	MM	DD	hh	mm	p	Bx	By	Bz
2023	01	01	00	00	2	-245.73	-964.10	63.50
2023	01	01	00	01	2	-243.40	-961.93	63.95
2023	01	01	00	02	2	-240.09	-955.63	65.35
2023	01	01	00	03	2	-238.35	-954.50	66.80
2023	01	01	00	04	2	-238.60	-952.50	68.17
2023	01	01	00	05	2	-238.56	-949.58	68.97
2023	01	01	00	06	2	-239.59	-946.78	70.25
2023	01	01	00	07	2	-238.19	-949.73	70.56
2023	01	01	00	08	2	-237.76	-948.06	71.99
2023	01	01	00	09	2	-238.86	-948.06	72.64
2023	01	01	00	10	2	-239.57	-947.50	73.38
2023	01	01	00	11	2	-238.72	-948.31	73.67
2023	01	01	00	12	2	-238.94	-947.90	73.78
2023	01	01	00	13	2	-238.58	-949.35	73.82
2023	01	01	00	14	2	-238.05	-946.82	74.14
2023	01	01	00	15	2	-237.34	-944.97	74.57
2023	01	01	00	16	2	-235.71	-942.26	75.10
2023	01	01	00	17	2	-235.30	-938.13	77.06
2023	01	01	00	18	2	-235.23	-936.24	77.73
2023	01	01	00	19	2	-234.88	-937.20	78.45
2023	01	01	00	20	2	-235.84	-938.14	79.81

Рис. 2. Формат исходных данных с КА «Электро-Л» №4

Первичная обработка данных заключалась в объединении файлов за отдельные месяцы и их импорте в специализированный программный комплекс Geosoft Oasis Montaj [Oasis...]. В рамках данного комплекса была создана база данных, организованная по месяцам, где вся информация хранится в табличной форме на отдельных листах (рис. 3). Такая структура обеспечивает удобство визуализации и анализа месячных вариаций магнитного поля.

№	ИЧ:0	HOUR	MIN	Bx	By	Bz	B	LAT	LON	Y	T0	DATE	Kp	TIME
9137.0								0.00	168.00	107.24			*	
9138.0	6	7	490.40	106.17	176.88	532.03	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:07:00.00	*	
9139.0	6	8	488.72	104.21	177.84	530.41	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:08:00.00	*	
9140.0	6	9	486.67	102.43	177.85	528.18	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:09:00.00	*	
9141.0	6	10	486.45	101.92	177.75	527.84	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:10:00.00	*	
9142.0	6	11	485.66	101.75	177.42	526.97	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:11:00.00	*	
9143.0	6	12	484.49	101.45	177.95	526.01	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:12:00.00	*	
9144.0	6	13	482.46	101.32	178.15	524.19	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:13:00.00	*	
9145.0	6	14	480.75	101.00	177.99	522.50	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:14:00.00	*	
9146.0	6	15	479.61	100.15	178.51	521.46	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:15:00.00	*	
9147.0	6	16	479.07	99.89	178.52	520.92	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:16:00.00	*	
9148.0	6	17	478.95	99.67	178.63	520.80	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:17:00.00	*	
9149.0	6	18	479.14	99.16	178.68	520.90	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:18:00.00	*	
9150.0	6	19	478.30	98.20	178.53	519.89	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:19:00.00	*	
9151.0	6	20	478.22	97.78	177.30	519.32	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:20:00.00	*	
9152.0	6	21	477.32	96.94	177.29	518.33	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:21:00.00	*	
9153.0	6	22	474.65	96.77	177.58	515.94	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:22:00.00	*	
9154.0	6	23	473.45	95.25	177.67	514.58	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:23:00.00	*	
9155.0	6	24	470.18	92.85	177.92	511.22	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:24:00.00	*	
9156.0	6	25	468.53	92.01	178.10	509.61	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:25:00.00	*	
9157.0	6	26	469.29	90.11	178.13	509.98	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:26:00.00	*	
9158.0	6	27	469.05	87.02	178.20	509.25	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:27:00.00	*	
9159.0	6	28	469.35	84.28	178.80	509.28	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:28:00.00	*	
9160.0	6	29	471.35	82.11	178.57	510.69	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:29:00.00	*	
9161.0	6	30	472.40	80.55	178.60	511.42	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:30:00.00	*	
9162.0	6	31	471.15	78.57	178.21	509.82	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:31:00.00	*	
9163.0	6	32	468.30	75.01	178.04	506.59	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:32:00.00	*	
9164.0	6	33	466.98	73.11	178.43	505.23	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:33:00.00	*	
9165.0	6	34	466.58	71.44	178.63	504.69	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:34:00.00	*	
9166.0	6	35	468.01	69.67	178.61	505.76	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:35:00.00	*	
9167.0	6	36	469.70	68.62	178.87	507.27	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:36:00.00	*	
9168.0	6	37	468.89	68.07	178.71	506.39	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:37:00.00	*	
9169.0	6	38	469.51	66.97	178.91	506.89	0.00	168.00	107.24	2023/04/01	*	06:38:00.00	*	

Рис. 3. Формат исходных данных с КА «Электро-Л» №4, загруженных в Geosoft Oasis Montaj

Анализ исходных данных выявил их специфику по сравнению с наземными измерениями. Помимо периодических вариаций, аналогичных наблюдаемым в наземных обсерваториях, в данных КА присутствуют скачкообразные изменения среднего уровня всех трёх компонент магнитного поля, связанные с процедурой перекалибровки магнитометра. Данные артефакты оказывают существенное влияние на расчёт суммарного модуля вектора B , искажая его периодичность, что исключает

возможность прямого применения стандартных алгоритмов обработки наземных магнитовариационных данных (рис. 4).

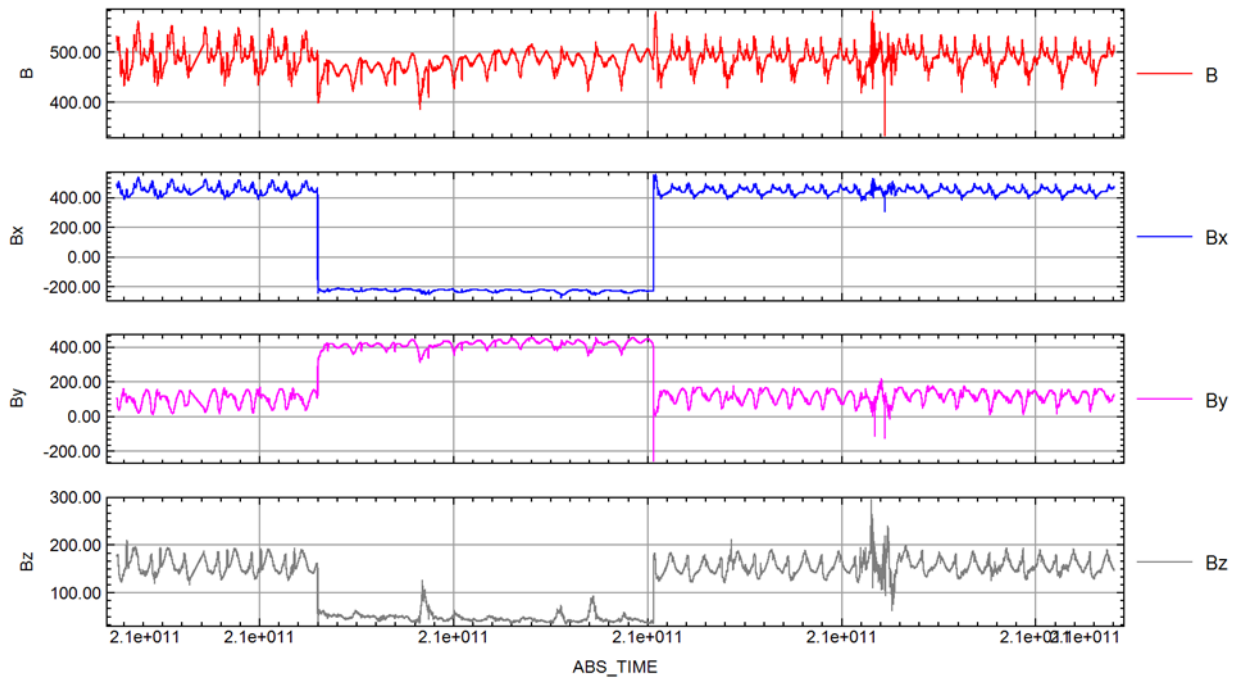


Рис. 4. Данные с магнитометра ФМ, установленного на КА «Электро-Л» №4, за апрель 2023 года

3. ВЫБОР КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И ВЫДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Для создания индекса геомагнитной активности необходима компонента магнитного поля, наиболее чувствительная к кратковременным возмущениям, связанным с геомагнитными бурями. В ходе анализа было установлено, что компоненты B_x и B_y являются значительно более зашумленными по сравнению с компонентой B_z в геоцентрической солнечно-магнитосферной системе координат (GSM). В компоненте B_z как слабые, так и средние геомагнитные возмущения проявляются наиболее отчетливо (рис. 5). В связи с этим для последующих расчётов была выбрана компонента B_z (GSM).

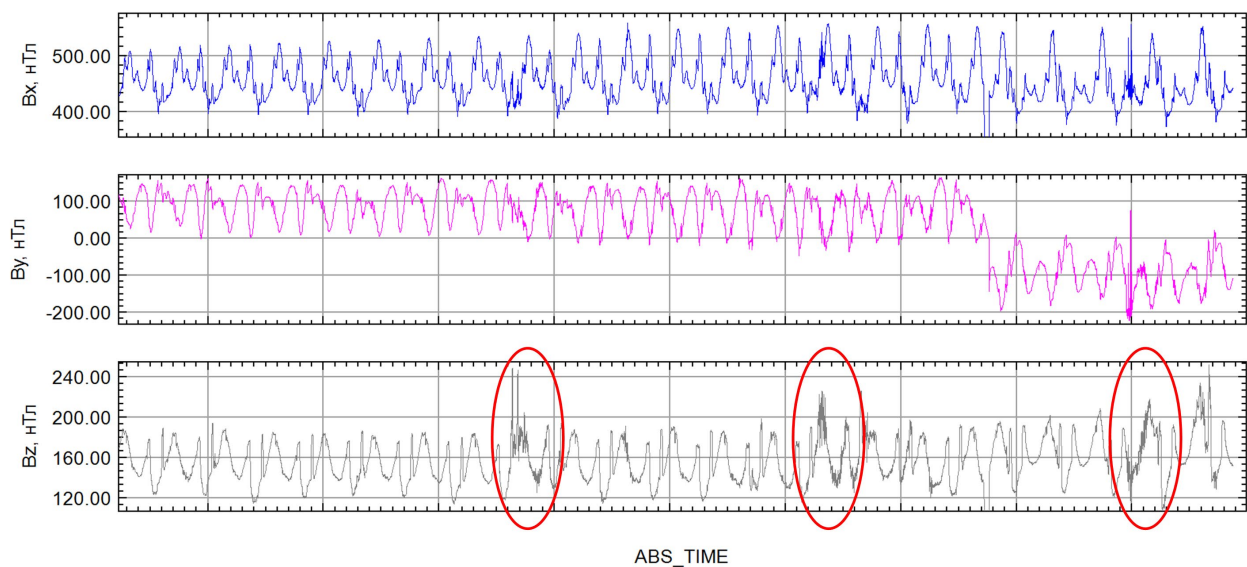


Рис. 5. Выделенные области зашумления данных, связанных с геомагнитными бурями

Ключевым этапом обработки является выделение высокочастотной составляющей сигнала, которая непосредственно связана с искомыми кратковременными возмущениями. Для этого применялся метод цифровой фильтрации. Исходный сигнал B_z обрабатывался фильтром Баттерворта низких частот 8-го порядка с частотой среза 0.15 Гц. Целью данной процедуры являлось удаление длиннопериодных вариаций, не связанных с повышенной геомагнитной активностью. Высокочастотная составляющая (B_{z_HF}) выделялась как разность между исходным сигналом (B_{z_raw}) и отфильтрованным ($B_{z_filtered}$) (рис. 6):

$$B_{z_HF} = B_{z_raw} - B_{z_filtered} \quad (1)$$

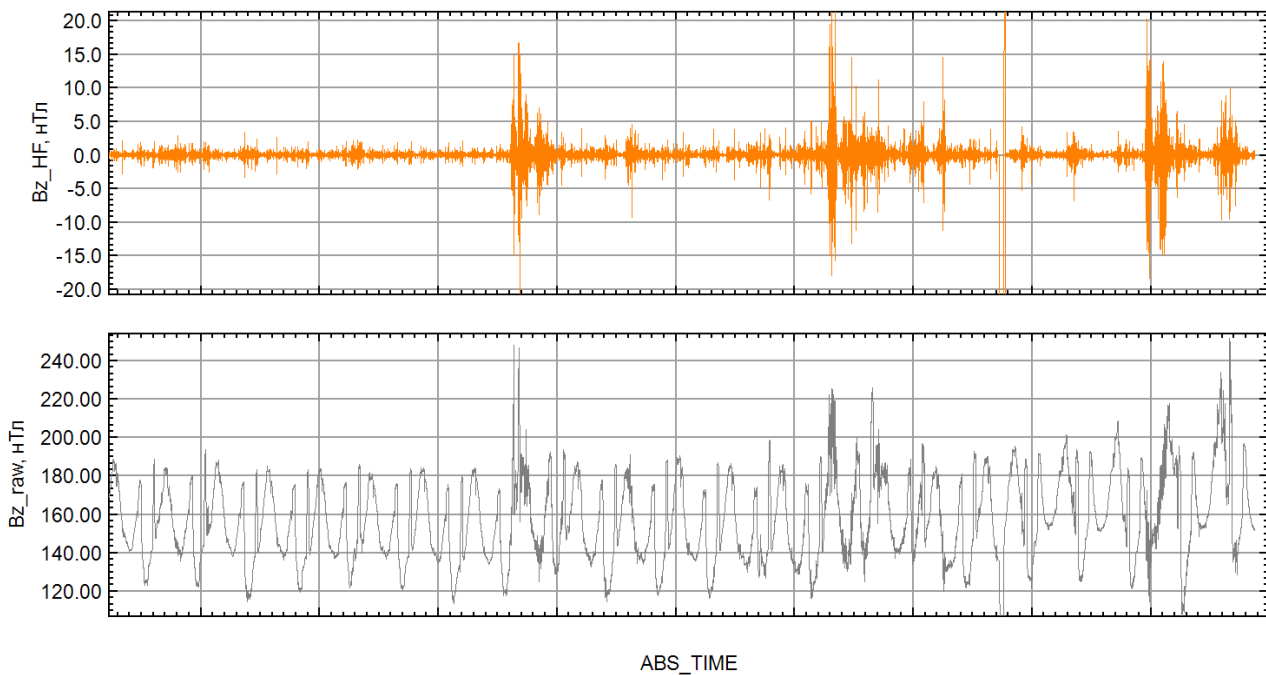


Рис. 6. Вычисленная высокочастотная составляющая B_{z_HF} (оранжевым) исходного магнитного поля B_{z_raw} (серым)

4. АЛГОРИТМ РАСЧЁТА ИНДЕКСА $Kkos$

Разработанный алгоритм расчёта индекса $Kkos$ состоит из трёх последовательных этапов: агрегации данных, калибровки и финального ранжирования. На первом этапе полученная высокочастотная составляющая B_{z_HF} агрегируется по трёхчасовым интервалам (0-3, 3-6, ..., 21-24 UTC), полностью соответствующим временным окнам стандартного Kp -индекса. Для каждого такого интервала вычисляется среднее значение B_{z_HF} , что позволяет перейти от непрерывных измерений к дискретным величинам, характеризующим уровень активности.

Ключевой этап алгоритма – калибровка и нормировка полученных средних значений. Для перехода от физических величин (нТл) к безразмерным значениям индекса была проведена эмпирическая калибровка по эталонным данным Kp -индекса, предоставляемым GFZ. На основе совместного анализа данных за апрель-сентябрь 2023 года была построена специализированная шкала перевода, где каждому диапазону средних значений B_{z_HF} ставится в соответствие определённое значение индекса $Kkos$ (табл. 1). Данная шкала обеспечивает сопоставимость нового космического индекса с общепринятой планетарной шкалой Kp .

Финальным шагом является визуализация и анализ рассчитанного индекса. Рассчитанные значения $Kkos$ сохраняются в табличной форме, что позволяет строить временные ряды для анализа динамики геомагнитной активности и проводить их сравнительный анализ с наземными эталонами.

Таблица 1. Шкала перевода индекса $Kkos$, нормированная по индексу Kp (GFZ)

Диапазон значений, B_{z_HF} , нТл	Значение индекса $Kkos$
0.0001-0.10	0
0.10-0.12	0.333
0.12-0.15	0.667
0.15-0.20	1
0.20-0.28	1.333
0.28-0.37	1.667
0.37-0.50	2
0.50-0.62	2.333
0.62-0.73	2.667
0.73-0.90	3
0.90-1.15	3.333
1.15-1.40	3.667
1.40-1.80	4
1.80-2.20	4.333
2.20-2.70	4.667
2.70-3.20	5
3.20-3.90	5.333
3.90-4.80	5.667
4.80-6.00	6
6.00-7.60	6.333
7.60-9.50	6.667
9.50-12.0	7
12.0-14.0	7.333
14.0-16.7	7.667
16.7-20.0	8
20.0-22.5	8.333
22.5-26.0	8.667
26.0-30.0	9

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Применение разработанного алгоритма к данным с КА «Электро-Л» №4 позволило получить первый в России специализированный индекс геомагнитной активности $Kkos$ для космических аппаратов. Визуальный анализ данных за сентябрь 2023 года демонстрирует выраженную корреляцию между вариациями высокочастотной компоненты B_{z_HF} и динамикой эталонного Kp -индекса (рис. 7).

Статистическая оценка точности методики по данным за апрель-сентябрь 2023 года показывает хорошие результаты. Коэффициент корреляции между $Kkos$ и Kp составляет 0.65 при среднеквадратическом отклонении 0.75. Особенно важно, что индекс успешно детектирует все основные геомагнитные бури периода исследований, когда значения Kp превышали 3 (рис. 8).



Рис. 7. Совместный анализ высокочастотной компоненты B_z_{HF} и индекса K_p (GFZ) за сентябрь 2023 года

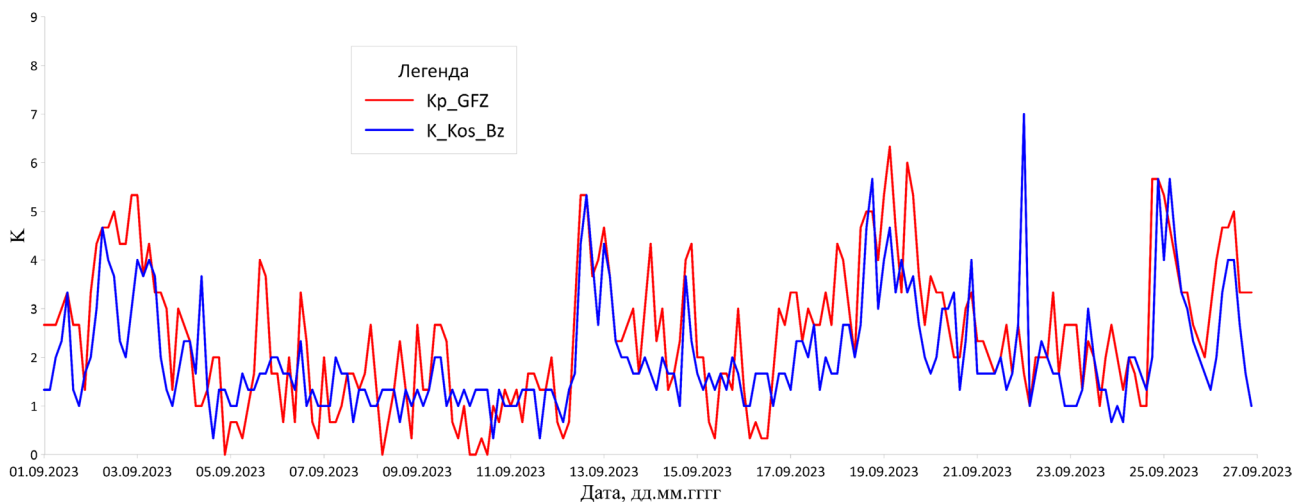


Рис. 8. Сравнение индексов K_{kos} и K_p (GFZ) за сентябрь 2023 года

Сравнение K_{kos} с двумя независимыми наземными индексами – K_p (GFZ) и K_p_{RUS} (индекс, основанный на данных российских станций [Шклярчук и др., 2024]) – подтверждает надежность методики. На графике за апрель 2023 года явно прослеживается согласованность всех трех индексов в моменты значительных возмущений (рис. 9).

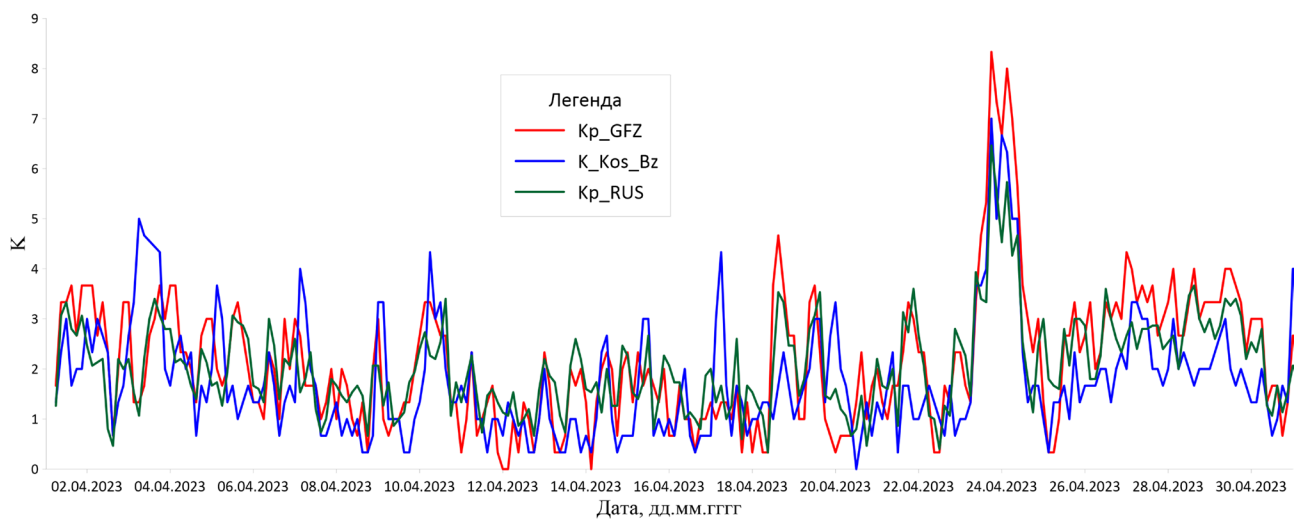


Рис. 9. Сравнение K_{kos} с индексами K_p (GFZ) и K_p_{RUS} за апрель 2023 года

Анализ расхождений выявил, что основные различия проявляются в периоды спокойной геомагнитной обстановки (K_p 0-3). Эта особенность объясняется комплексом факторов: более высоким уровнем шума феррозондового магнитометра ФМ по сравнению с наземными эталонами,

фундаментальными различиями в точках наблюдения, а также различной реакцией магнитного поля в околоземном пространстве и на поверхности на одни и те же солнечные возмущения.

Таким образом, валидация индекса $Kkos$ против наземных аналогов подтверждает его состоятельность как нового инструмента мониторинга геомагнитной активности из космоса.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработан и апробирован новый подход к мониторингу геомагнитной активности с использованием данных космического аппарата «Электро-Л» №4. Предложенная методика расчета индекса $Kkos$ демонстрирует принципиальную возможность эффективного использования бортовых магнитометрических измерений для оперативной диагностики состояния магнитосферы. На основе комплексного анализа данных за апрель-сентябрь 2023 года установлено, что высокочастотная составляющая компоненты B_z в системе GSM является надежным индикатором геомагнитных возмущений.

Полученные результаты показывают хорошее согласование космического индекса $Kkos$ с наземными аналогами. Коэффициент корреляции 0.65 и среднеквадратическое отклонение 0.75 свидетельствуют о конкурентоспособности методики, особенно в области детектирования сильных геомагнитных бурь. Выявленные расхождения в периоды спокойной геомагнитной обстановки объясняются комплексом факторов, включая инструментальные погрешности магнитометра ФМ и фундаментальные различия в характере измерений в космическом пространстве и на поверхности Земли.

Перспективы развития методики связаны с накоплением репрезентативной статистики за полный солнечный цикл, исследованием альтернативных подходов к фильтрации сигнала, а также разработкой поправочных коэффициентов, учитывающих орбитальные параметры космического аппарата. Особый интерес представляет адаптация алгоритма для работы с данными других отечественных космических аппаратов с целью создания распределенной системы мониторинга.

Практическая значимость работы заключается в создании основ для оперативного прогноза космической погоды на основе отечественных космических данных. Индекс $Kkos$ может стать ценным дополнением к существующей системе наземного мониторинга, обеспечивая уникальную информацию о состоянии магнитосферы непосредственно из околоземного пространства. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят повысить надежность и точность методики, а также расширить ее применение в интересах решения прикладных задач космической погоды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках НИТР Росгидромета 2025 г. (тема 6.1). Уникальный номер реестровой записи 720000Ф.99.1.БН62АА28000.

ЛИТЕРАТУРА

- Шклярчук А.Д., Арутюнян Д.А., Брагина А.А. Разработка региональных индексов геомагнитной активности и алгоритма краткосрочного прогноза геомагнитной обстановки // Гелиогеофизические исследования, вып. 45, 2024. С. 69-76.
- Matzka, J., Stolle C. The Geomagnetic Kp Index and Derived Indices of Geomagnetic Activity // Space Weather, vol. 19, is. 5, 2021. 21 p. DOI: 10.1029/2020SW002641.
- Oasis Montaj. How-to Guide [Электронный ресурс]. URL: <http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/> (дата обращения 20.10.2025).
- Pulkkinen T. Space Weather: Terrestrial Perspective // Living Reviews in Solar Physics, vol. 4, 2007. DOI: 10.12942/lrsp-2007-1.
- Shprits Y.Y., Vasile R, Zhelavskaya I.S. Nowcasting and Predicting the Kp Index Using Historical Values and Real-Time Observations // Space Weather, vol. 17, is. 8, 2019. P. 1219-1229. DOI: 10.1029/2018SW002141.
- Tsurutani B.T., Gonzalez W.D., Lakhina G.S., Alex S. The extreme magnetic storm of 12 September 1859 // Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 108, is. A7, 2003. 8 p. DOI: 10.1029/2002JA009504.

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF THE *K*_{KOS} SPACE GEOMAGNETIC INDEX FROM FM MAGNETOMETER DATA OF THE «ELEKTRO-L» NO. 4 SATELLITE

Shklyaruk A. D., Arutyunyan D. A., Bragina A. A.

This paper presents a novel method for calculating the *Kkos* geomagnetic activity index based on magnetic field measurements from the geostationary satellite «Elektro-L» No. 4. In contrast to traditional ground-based indices relying on the horizontal component of the field, the high-frequency component of the B_z magnetic field vector in the Geocentric Solar Magnetospheric (GSM) coordinate system was used as the foundational parameter. Based on a joint analysis with the reference ground-based *Kp* index (GFZ) for the period April-September 2023, an empirical conversion scale was developed to quantify the level of magnetospheric disturbances. The performed validation showed a good correlation (correlation coefficient of 0.65) between *Kkos* and *Kp*, especially during periods of strong storms ($Kp > 3$). The proposed method opens prospects for operational space weather monitoring using spacecraft and complementing existing ground-based networks. The paper also discusses the main sources of errors and directions for further algorithm improvement.

KEYWORDS: GEOMAGNETIC ACTIVITY, SPACE WEATHER, *Kp* INDEX, «ELEKTRO-L» SATELLITE, MAGNETOMETER, HIGH-FREQUENCY DISTURBANCES, B_z COMPONENT, VALIDATION.