

УДК 550.385.4

СООТВЕТСТВИЕ ВАРИАЦИЙ AE И Apo ИНДЕКСОВ В 23–24-м СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

© 2024 г. Т. Л. Гуляева¹, *

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троцк, Россия

*e-mail: gulyaeva@izmiran.ru

Поступила в редакцию 25.10.2023 г.

После доработки 03.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Индекс авроральной электроструи AE часто используется в прогностических моделях как характеристика источника распространения возмущения в геосфере от полюса к средним и низким широтам. Однако эти данные не предоставляются в цифровом виде с января 2020 г. Вместо AE -индекса в данной работе предлагается использовать недавно введенный 1-часовой Apo -индекс, учитывая близкое расположение сетей магнитометров для этих индексов в высоких широтах и наличие Apo -индекса в реальном времени. С этой целью проанализирована их корреляция во время 276 интенсивных бурь за 1995–2017 гг. Профили бурь построены методом совмещения эпох с началом отсчета $t_0 = 0$ при пороговом значении $AE \geq 1000$ нТл. Проведено сравнение профилей бурь $AE(t)$, $Apo(t)$, межпланетного электрического поля $E(t)$ и скорости солнечного ветра $V_{sw}(t)$ в течение 72 ч: 24 ч до пика бури t_0 , и 48 ч после него. Получено хорошее соответствие между рядами $AE(t)$ и $Apo(t)$ с коэффициентом корреляции 0.70. Сравнение с межпланетными параметрами показало корреляцию $AE(t)$ и $Apo(t)$ с электрическим полем $E(t)$ и отсутствие их прямой связи со скоростью солнечного ветра $V_{sw}(t)$. Выведена двухпараметрическая формула зависимости индекса авроральной электроструи $AE(t)$ от межпланетного электрического поля $E(t)$ и геомагнитного индекса $Apo(t)$ для использования в прогнозах геомагнитных бурь. В случае отсутствия данных $E(t)$ предложены формулы прямой зависимости $AE(t)$ от $Apo(t)$ для применения в реальном времени и обратной зависимости $Apo(t)$ от $AE(t)$ для реконструкции 1ч Apo -индекса до 1995 г. Проверка предложенных моделей по данным 5 интенсивных бурь в 2018 г. показала соответствие модельных расчетов наблюдательным данным AE -индекса с высоким коэффициентом определенности R^2 в пределах от 0.62 до 0.81.

DOI: 10.31857/S0016794024030091, EDN: SMJ OCD

1. ВВЕДЕНИЕ

Во время геомагнитных бурь электрическое поле магнитосферной конвекции усиливается, проникает во внешние L -оболочки и движется по силовым линиям к экватору. Наиболее подвержены влиянию космической погоды полярные и экваториальные зоны в магнитосфере и ионосфере [Tsurutani et al., 1990; Gulyaeva and Stanislawska, 2010; Gu et al., 2019; Prikrýl et al., 2022]. Это, в частности, подтверждается широким использованием в операционных системах мониторинга и прогноза космической погоды индексов авроральной электроструи AE и кольцевого тока, представленного экваториальным Dst -индексом. AE -индекс был введен для измерений вариаций горизонтальной компоненты H геомагнитного поля в вы-

бранных 10–13 обсерваториях [Davis and Sugiura, 1966]. Верхняя граница отклонений H от спокойного уровня обозначена как AU -индекс, нижняя граница как AL -индекс, представляющие соответственно интенсивности восточной и западной авроральной электроструи. AE -индекс представляет собой разность AU и AL ($AE = AU - AL$). Наряду с другими известными параметрами, индексы AE , AU и AL широко используются в исследованиях влияния космической погоды на космические и телекоммуникационные системы [Schrijver, 2015], авиационную безопасность [Göker, 2023] и другие технологии.

AE -индекс широко применяется для исследования морфологии суббурь, ионосферных бурь, радио мерцаний и взаимосвязи межпланетного

магнитного поля с магнитосферой Земли [Echer et al., 2006; Klimenko et al., 2011; Luo et al., 2013; Nesse Tyssøy et al., 2021; Белюченко и др., 2022]. Его практическое применение в ионосферных прогнозах [Li et al., 2015; Yenen et al., 2015; Гуляева, 2016а, б] затруднено из-за отсутствия этих данных в числовом формате с января 2020 г. на сайте провайдера (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>).

Отсутствие данных AE в реальном времени частично компенсируется прогнозами AE -индекса, основанными на измерениях параметров солнечного ветра [Luo et al., 2013; Gu et al., 2019]. Корреляции аврорального AE -индекса с другими индикаторами магнитосферных возмущений исследовались ранее в ряде работ [Rostoker, 1991; Cade III et al., 1995; Fares Saba et al., 1997; Шубин и др., 1998; Adebessin, 2016; Bergin et al., 2020; Гуляева, 2023]. В них использовались сравнения AE с трехчасовыми ap и Kp -индексами, минутными SME и SMR -индексами и часовыми Dst -индексами. Было показано, что более плотная сеть магнитометров SuperMAG позволяет улучшить оценку эффектов ионосферно-магнитосферных возмущений с помощью индексов SME , рассчитанных по методике AE , и измерений кольцевого тока SMR , подобных Dst [Bergin et al., 2020]. Однако данные SuperMAG имеются только до конца 2022 г., они не предоставляются в реальном времени и поэтому не используются в прогнозах.

Недавно ряды трехчасовых геомагнитных индексов Kp и ap пополнились 1-часовыми ($Hr060$ и $ar060$) и 30-минутными ($Hr030$ и $ar030$) индексами, измеряемыми на их общей сети магнитометров вблизи аврорального овала [Yamazaki et al., 2022]. Обозначим для краткости 1-часовые индексы $Hr0 = Hr060$ и $Ar0 = ar060$ соответственно. Индексы $Hr0$ и $Ar0$ доступны с 1995 г. на сайте (<https://kp.gfz-potsdam.de/en/hp30-hr60>) и продолжают регулярно пополняться в режиме реального времени. В данной работе впервые исследуются взаимосвязи между AE - и $Ar0$ -индексами во время интенсивных геомагнитных бурь, с целью использования нового ряда 1-часовых $Ar0$ индексов в прогнозах эффектов геомагнитных бурь вместо отсутствующих цифровых данных AE -индекса.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Прежде чем перейти к сравнению поведения геомагнитных AE и $Ar0$ индексов во время интенсивных геомагнитных бурь, рассмотрим расположение сетей магнитометров, на основе измерений которых вычисляются эти индексы (рис. 1). Видно близкое расположение источ-

ников данных в высоких широтах. Сеть магнитометров для AE -индекса располагается выше 60° магнитной широты в Северном полушарии, а сеть для $Ar0$ -индекса, совпадающая с сетью 3-часовых ap - и Kp -индексов, — вблизи 60° магнитной широты в Северном полушарии и двух станций в Южном полушарии.

Сравнение профилей бури для AE и $Ar0$ -индексов выполнено методом совмещения эпох для 276 интенсивных бурь, с началом отсчета $t_0 = 0$ при пороговом значении $AE \geq 1000$ нТл за 1995–2017 гг. При наличии ряда значений $AE \geq 1000$ нТл в течение бури, начало отсчета $t_0 = 0$ отнесено к наибольшему значению AE . Профили бурь вычислены в течение 72 ч: 24 ч до пика бури t_0 , и 48 ч после него. Результаты показаны на рис. 2а – профили бурь $AE(t)$ и рис. 2б – профили бурь $Ar0(t)$. В работе [Куражковская и Куражковский, 2023] показана зависимость Ar - и Dst -индексов от индикаторов солнечной активности, а также от параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Межпланетное электрическое поле показывает наилучшую корреляцию с геомагнитными индексами и отрицательными ионосферными возмущениями [Crooker and Gringauz, 1993; Kim and Chang, 2014; Gulyaeva, 2024]. В данной работе профили параметров межпланетного электрического поля $E(t)$ (рис. 2в) и скорости солнечного ветра $V_{sw}(t)$ (рис. 2г) посчитаны для сравнения с вариациями $AE(t)$ и $Ar0(t)$ во время 276 интенсивных бурь. Электрическое поле солнечного ветра E (в единицах мВ/м) вычисляется как произведение южной компоненты Межпланетного магнитного поля, B_z (нТл) на скорость солнечного ветра V_{sw} (км/с) с обратным знаком и предоставляется на сайте (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html):

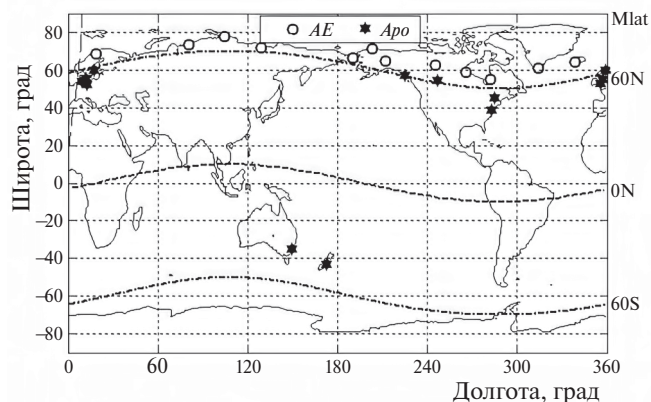


Рис. 1. Сети магнитометров, поставляющие данные для производства AE - и $Ar0$ -индексов.

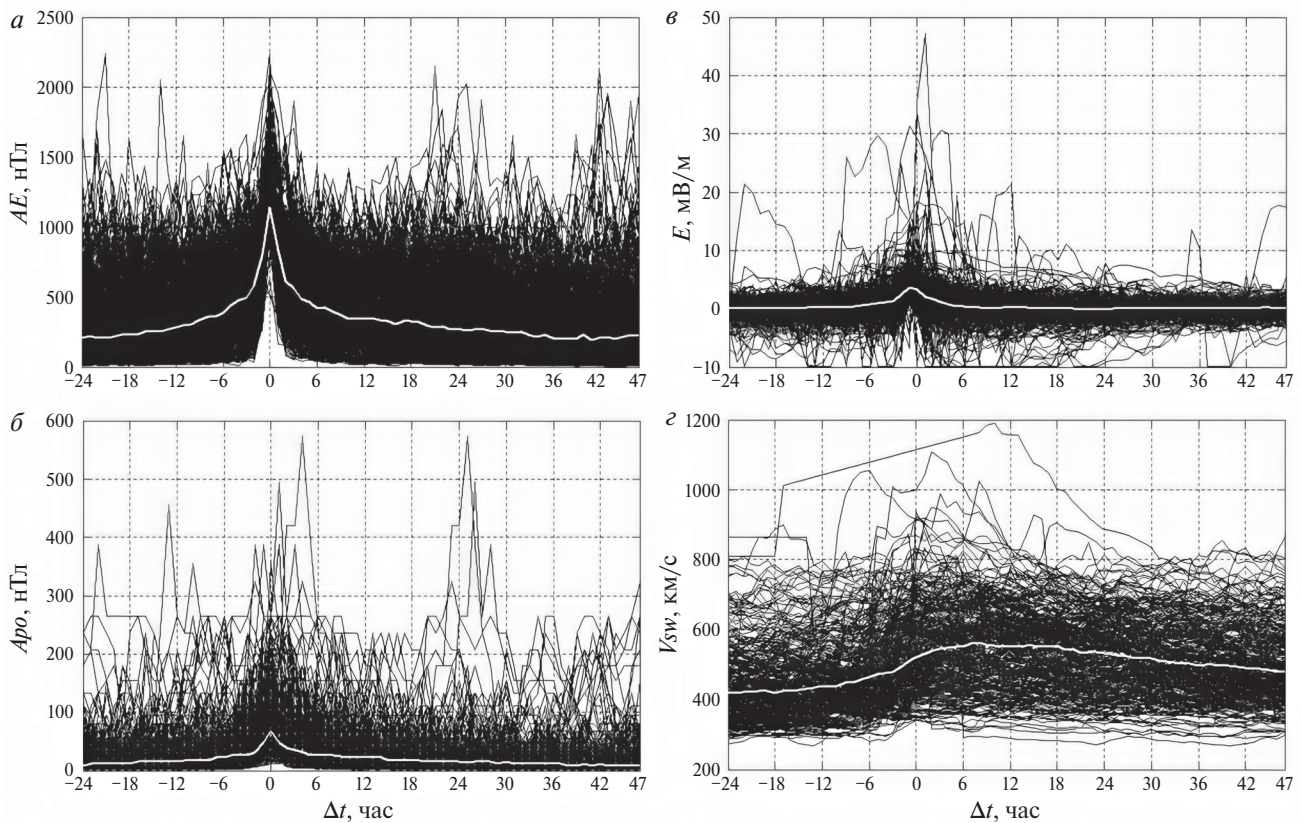


Рис. 2. Профили интенсивных бурь за 1995–2017 гг., центрированные к моменту пика AE -индекса: (а) профили $AE(t)$; (б) $Apo(t)$; (в) $E(t)$; (г) $V_{sw}(t)$. Индивидуальные профили – черные линии, медиана – белая кривая.

$$E = -B_z V_{sw} 10^{-3}. \quad (1)$$

Индивидуальные профили бурь показаны на рис. 2а–г черными линиями, медиана – белая кривая. В медианах, в частности, хорошо видно совпадение пика бурь Apo с пиком бурь AE . Видно, что пик $E_{\max}$ опережает на 1 ч t_0 , в то время как $V_{sw_{\max}}$ запаздывает на 8 ч после t_0 . Пик $E_{\max}$ отражает момент пика южной компоненты B_z при возросшей скорости V_{sw} (уравнение (1)). Визуально вариации профиля бурь $E(t)$ соответствуют вариациям $AE(t)$ и $Apo(t)$, что подтверждает изменения в AE под влиянием конвекции электрического поля солнечного ветра [Gu et al., 2019]. Исследование корреляций различных параметров космической погоды с геомагнитным Dst -индексом также показали его наилучшее соответствие произведению $[V_{sw} B_z]$, пропорциональному электрическому полю [Samwel and Miteva, 2023]. Запаздывание по времени скорости солнечного ветра в максимуме, $V_{sw_{\max}}$, после t_0 свидетельствует о том, что скорость солнечного ветра V_{sw} не пригодна для использования в прогнозах интенсивных бурь AE - и Apo -индексов, развитие которых предшествует пика V_{sw} .

Таблица 1. Коэффициент корреляции между значениями 4-х рассмотренных индексов во время интенсивных геомагнитных бурь

Индекс	V_{sw}	E	AE	Apo
V_{sw}	1	0.02	0.29	0.36
E		1	0.58	0.50
AE			1	0.70
Apo				1

Качественное сравнение профилей бурь на рис. 2а–г подтверждается коэффициентом корреляции между рассмотренными параметрами, представленным в табл. 1. Заметим, что в эти сравнения включены все моменты профилей бури – за 24 ч до ее пика t_0 и 48 ч в фазе восстановления. Из табл. 1 видно, что корреляция отсутствует между V_{sw} и E , слабая корреляция наблюдается между V_{sw} и AE и между V_{sw} и Apo . Коэффициент корреляции улучшается между

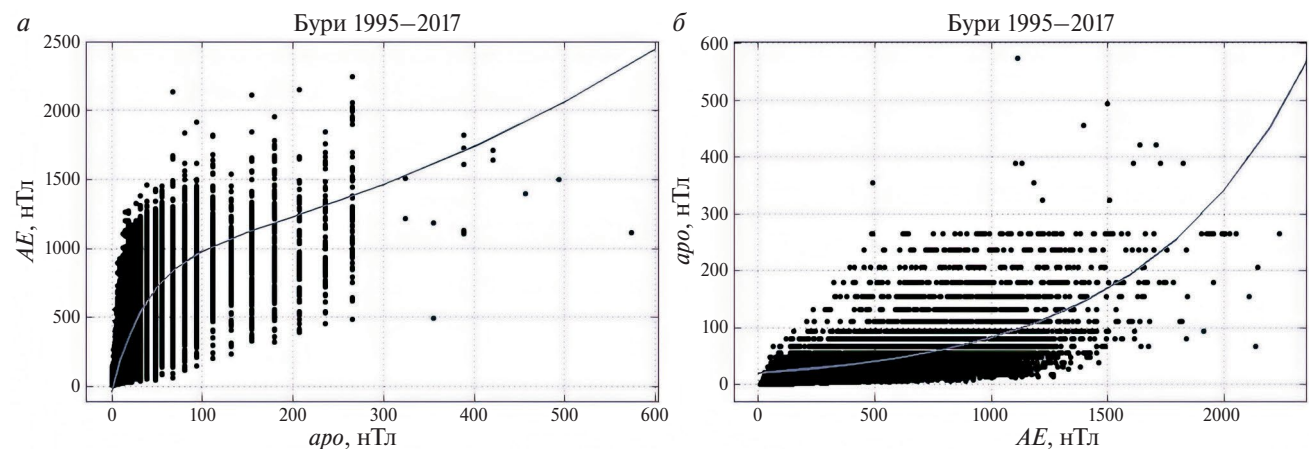


Рис. 3. Регрессионные зависимости между индексами *AE* и *Aro*: (а) зависимость *AE* от *Aro*; (б) зависимость *Aro* от *AE*.

индексами *E* и *AE* и между *E* и *Aro*. Наилучшая корреляция наблюдается между *AE*- и *Aro*-индексами с коэффициентом корреляции, равным 0.70. Это свойство мы используем для вывода уравнений связи между исследуемыми индексами.

На рис. 3а приведена зависимость индекса *AE* от *Aro*, и на рис. 3б — обратная ей зависимость *Aro* от *AE*, построенная по данным профилей бурь, приведенных на рис. 2а, б. Точками показаны исходные данные, сплошная кривая — экспоненциальная модель, построенная по методу наименьших квадратов:

$$AE = a e^{bAro} \tag{2}$$

$$Aro = a_1 e^{b_1AE} \tag{3}$$

Коэффициенты аппроксимаций (2–3) приведены в табл. 2 с указанием меры определенности *R*². Полученные значения *R*² показывают хорошее приближение модели к данным.

Таблица 2. Коэффициенты экспоненциальных выражений (2–3) и мера определенности *R*²

Модель	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i> ₁	<i>b</i> ₁	<i>R</i> ²
<i>AE</i> (<i>Aro</i>)	316.0014	0.0053			0.453
<i>Aro</i> (<i>AE</i>)			12.9814	0.0017	0.476

Выражения (2–3) включают все точки профилей бурь. При наличии данных межпланетного электрического поля профиль бурь *AE*-индекса можно представить в зависимости от двух параметров: *E* и *Aro*. Такая двухпараметрическая зависимость представлена на рис. 4 и в уравнении (4):

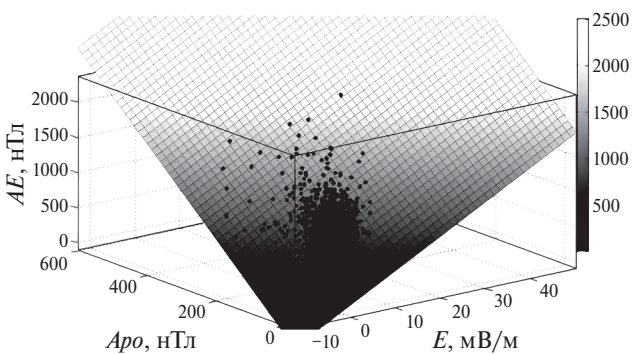


Рис. 4. Двухпараметрическая зависимость профиля бурь *AE*-индекса от параметров *E* и *Aro*.

$$AE = p_{00} + p_{10}E + p_{01}^{Aro} \tag{4}$$

Коэффициенты уравнения (4) представлены в табл. 3 с указанием меры определенности *R*². Параметр *R*² показывает высокую точность модели.

Таблица 3. Коэффициенты двухпараметрической модели (4) и мера определенности *R*²

Модель	<i>p</i> ₀₀	<i>p</i> ₁₀	<i>p</i> ₀₁	<i>R</i> ²
<i>AE</i> (<i>E</i> , <i>Aro</i>)	219.1	34.88	4.955	0.561

Как указано выше, мы исследовали все интенсивные бури за время имеющегося ряда часовых *Aro*- и *AE*-индексов с 1995 по 2017 гг. Данные *AE*-индекса в цифровом виде имеются по март 2019 г. С января 2018 г. по декабрь 2019 г. наблюдалось 12 интенсивных бурь с *AE*-индексом, превышающим 1000 нТл, 5 из которых перечислены в табл. 4.

Таблица 4. Проверка моделей (2) и (4) для 5 бурь в 2018 г.

Дата	$AE_{\max}$, нТл	$Apo_{\max}$, нТл	$E_{\max}$, мВ/м	R^2 (2)	R^2 (4)
18.03.2018 г.	1113	111	3.56	0.62	0.71
20.04.2018 г.	1001	111	5.76	0.81	0.72
01.06.2018 г.	1001	56	3.86	0.71	0.77
26.08.2018 г.	1210	179	6.56	0.74	0.75
05.11.2018 г.	1045	94	3.66	0.64	0.72

Эти события относятся к минимуму солнечной активности, но интенсивность геомагнитных возмущений в них выбрана по тому же критерию $AE \geq 1000$ нТл, что и в списке проанализированных бурь. Мы используем профили этих 5 бурь, не включенных в данные при анализе, для проверки предложенных моделей. Сравнение проводилось для каждого события в течение 3-х календарных дней: один день до пика бури $AE_{\max}$, день пика бури, указанный в 1-м столбце табл. 4, и один день, следующий за пиком бури. Всего сравнение проводилось в течение 72 ч для каждого события. Результаты представлены на рис. 5 и рис. 6 и в табл. 4.

На рис. 5 и рис. 6 (верхняя панель) представлены данные наблюдаемого АЕ-индекса (кривая 1), результаты расчета по модели (2) – кривая 2, и расчета по модели (4) – кривая 3. Исходные данные для расчетов показаны на средней

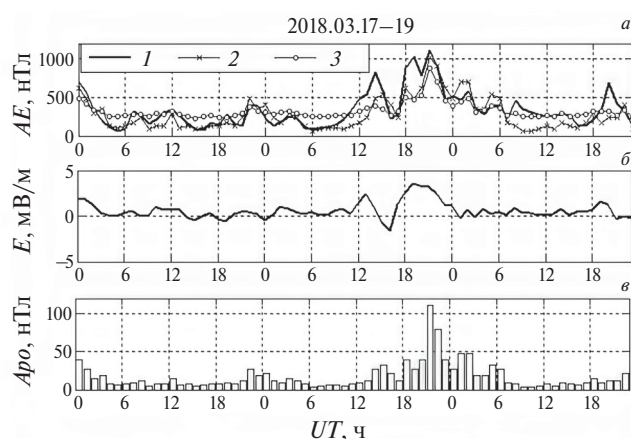


Рис. 5. Данные наблюдений и расчеты по модели во время бури с 17 по 19 марта 2018 г. (а) 1 – наблюдения АЕ-индекса; 2 – расчет по модели (2); 3 – расчет по модели (4); (б) наблюдения электрического поля E ; (в) наблюдения индекса Apo .

панели (электрическое поле E) и на нижней панели (планетарный Apo -индекс). На верхней панели видно близкое соответствие модельных расчетов данным наблюдений. На рис. 5 представлена буря с 17 по 19 марта 2018 г., при этом модели близко воспроизводят наблюдательный профиль бури АЕ-индекса. Пример на рис. 6 относится к буре с 25 по 27 августа 2018 г. На рис. 6 видно хорошее воспроизведение моделями вариаций АЕ-индекса, несмотря на сложную колебательную структуру его изменений во время бури.

Количественные оценки расчетов по моделям (2) и (4) для 5 контрольных примеров представлены в табл. 4. Здесь указаны максимальные значения наблюдаемых индексов во время бури ($AE_{\max}$, $Apo_{\max}$ и $E_{\max}$) и коэффициент определенности R^2 для моделей (2) и (4). Видно высокое значение коэффициента R^2 , с лучшими результатами для модели (4) по сравнению с моделью (2), за исключением 2-го события с 19 по 21 апреля 2018 г. В рассмотренных случаях коэффициент определенности R^2 меняется от 0.62 до 0.81.

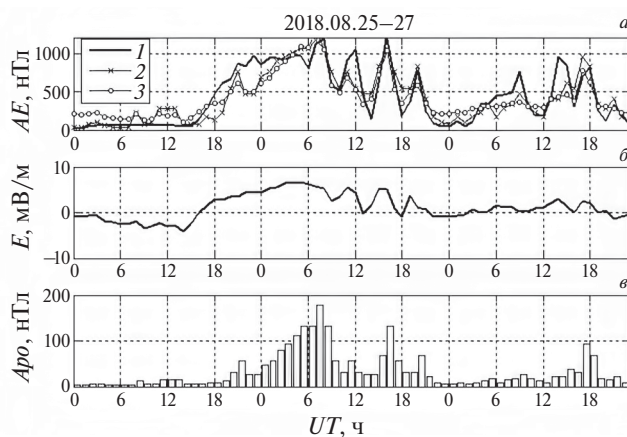


Рис. 6. Аналогично рис. 5 для бури с 25 по 27 августа 2018 г.

3. ВЫВОДЫ

Применение аврорального AE -индекса в прогностических моделях затруднено, так как с января 2020 г. данные AE приведены только в виде рисунков на сайте в Киото (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>). Учитывая близкое расположение источников данных для AE - и Apo -индексов, наличие цифровых данных Apo по адресу (<https://kp.gfz-potsdam.de/en/hp30-hp60>) и отсутствие таких данных AE в реальном времени, можно рекомендовать использование Apo -индекса в качестве управляющего параметра в геосферных моделях.

Этот вывод подтверждается проведенным исследованием корреляции $AE(t)$ и $Apo(t)$ индексов во время 276 интенсивных бурь за 1995–2017 гг. Профили бурь построены методом совмещения эпох с началом отсчета $t_0 = 0$ при пороговом значении $AE \geq 1000$ нТл. Проведено сравнение профилей бурь $AE(t)$, $Apo(t)$, межпланетного электрического поля $E(t)$ и скорости солнечного ветра $V_{sw}(t)$ в течение 72 ч: 24 ч до пика бури t_0 , и 48 ч после него. Получено хорошее соответствие между рядами $AE(t)$ и $Apo(t)$ с коэффициентом корреляции 0.70. Сравнение с межпланетными параметрами показало корреляцию $AE(t)$ и $Apo(t)$ с электрическим полем $E(t)$ и отсутствие их прямой связи со скоростью солнечного ветра $V_{sw}(t)$.

Выведена двухпараметрическая формула зависимости индекса авроральной электроструи $AE(t)$ от межпланетного электрического поля $E(t)$ и геомагнитного индекса $Apo(t)$ для использования в прогнозах геомагнитных бурь. В случае отсутствия данных $E(t)$ предложены формулы прямой зависимости $AE(t)$ от $Apo(t)$ для применения в реальном времени и обратной зависимости $Apo(t)$ от $AE(t)$ для реконструкции 1-часового Apo -индекса до 1995 г.

Проверка предложенных моделей по данным 5 интенсивных бурь в 2018 г. показала ее соответствие наблюдательным данным AE -индекса с высоким коэффициентом определенности R^2 в пределах от 0.62 до 0.81.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белюченко К.В., Клименко М.В., Клименко В.В., Ратовский К.Г. Связь возмущений полного электронного содержания с AE -индексом геомагнитной активности во время геомагнитной бури в марте 2015 г. // Солнечно-земная физика. Т. 8. № 3. С. 41–48. 2022. <https://doi.org/10.12737/szf-83202206>
- Гуляева Т.Л. Прогноз глобального электронного содержания в ионосфере в процессе развития геомагнитной бури / Тр. XX Всероссийской ежегодной конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2016”. СПб, 10–14 октября 2016 г. Ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын. С. 85–88. 2016а.
- Гуляева Т.Л. Идентичность AE и Apo индексов в 23–24 циклах солнечной активности / Тр. XXVII Всероссийской ежегодной конф. “Солнечная и солнечно-земная физика – 2023”. СПб, 9–13 октября 2023 г. Ред. А.В. Степанов, Ю.А. Наговицын. С. 85–88. 2016б. <https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-85-88>
- Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Эффект гистерезиса между индексами геомагнитной активности (Ap , Dst) и параметрами межпланетной среды в 21–24 циклах солнечной активности // Солнечно-земная физика. Т. 9. № 3. С. 73–82. 2023. <https://doi.org/10.12737/szf-93202308>
- Шубин В.Н., Иванов-Холодный Г.С., Ситнов Ю.С. Использование интегральных индексов для описания динамики магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 38. № 4. С. 16–23. 1998.
- Adebesein B.O. Investigation into the linear relationship between the AE , Dst and ap indices during different magnetic and solar activity conditions // Acta Geod. Geophys. V. 51. № 2. P. 315–331. 2016. <https://doi.org/10.1007/s40328-015-0128-2>
- Bergin A., Chapman S.C., Gjerloev J.W. AE , DST , and their SuperMAG counterparts: The effect of improved spatial resolution in geomagnetic indices // J. Geophys. Res. – Space. V. 125. № 5. ID e2020JA027828. 2020. <https://doi.org/10.1029/2020JA027828>
- Cade III W.B., Sojka J.J., Zhu L. A correlative comparison of the ring current and auroral electrojets using geomagnetic indices // J. Geophys. Res. – Space. V. 100. № 1. P. 97–105. 1995. <https://doi.org/10.1029/94JA02347>
- Crooker N.U., Gringauz K.I. On the low correlation between long-term averages of solar wind speed and geomagnetic activity after 1976 // J. Geophys. Res. – Space. V. 98. № 1. P. 59–62. 1993. <https://doi.org/10.1029/92JA01978>
- Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // J. Geophys. Res. V. 71. № 3. P. 785–801. 1966. <https://doi.org/10.1029/jz071i003p00785>
- Echer E., Gonzalez W.D., Alves M.V. On the geomagnetic effects of solar wind interplanetary magnetic structures // Space Weather. V. 4. № 6. ID S06001. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005SW000200>
- Fares Saba M.M., Gonzalez W.D., Cluúa de Gonzalez A.L. Relationships between the AE , ap and Dst indices near solar minimum (1974) and at solar maximum (1979) // Ann. Geophys. V. 15. № 10. P. 1265–1270. 1997. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-1265-x>
- Göker Ü.D. Short- and long-term changes in the neurophysiological status of pilots due to radiation exposure caused by geomagnetic storms // Medical Research Archives. V.11. № 9. 2023. <https://doi.org/10.18103/mra.v11i9.4395>
- Gu Y., Wei H.-L., Boynton R.J., Walker S.N., Balikhin M.A. System identification and data-driven forecasting of AE index and prediction uncertainty analysis using a new cloud-

- NARX model // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 124. № 1. P. 248–263. 2019. <https://doi.org/10.1029/1018JA025957>
- Gulyaeva T.L., Stanislawski I. Magnetosphere associated storms and autonomous storms in the ionosphere–plasmasphere environment // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* V. 72. № 1. P. 90–96. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.10.012>
- Gulyaeva T.L. Interaction of global electron content with the Sun and solar wind during intense geomagnetic storms // *Planet. Space Sci.* 2024. V. 240. ID 105830. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2023.105830>
- Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G., Goncharenko L.P., Sahai Y., Fagundes P.R., de Jesus R., de Abreu A.J., Vesnin A.M. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // *Radio Sci.* V. 46. № 3. ID RS0D03. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010RS004590>
- Li Sh., Galas R., Ewert D., Peng J. An empirical model for the ionospheric global electron content storm-time response // *Acta Geophys.* V. 51. № 1. P. 253–269. 2015. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0067>
- Luo B., Li X., Temerin M., Liu S. Prediction of the AU, AL, and AE indices using solar wind parameters // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 118. № 12. P. 7683–7694. 2013. <https://doi.org/10.1002/2013JA019188>
- Nesse Tysøy H., Partamies N., Babu E.M., Smith-Johnsen C., Salice J.A. The predictive capabilities of the Auroral Electrojet index for medium energy electron precipitation // *Front. Astron. Space Sci.* V. 8. ID 714146. 2021. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.714146>
- Prikryl P., Gillies R.G., Themens D.R., Weygand J.M., Thomas E.G., Chakraborty S. Multi-instrument observations of polar cap patches and traveling ionospheric disturbances generated by solar wind Alfvén waves coupling to the dayside magnetosphere // *Ann. Geophys.* V. 40. № 6. P. 619–639. 2022. <https://doi.org/10.5194/angeo-40-619-2022>
- Rostoker G. A quantitative relationship between AE and Kp // *J. Geophys. Res. – Space*. V. 96. № 4. P. 5853–5857. 1991. <https://doi.org/10.1029/90JA02752>
- Samwel S., Miteva R. Correlations between space weather parameters during intense geomagnetic storms: Analytical study // *Adv. Space Res.* V. 72. № 8. P. 3440–3453. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.07.053>
- Schrijver C.J. Socio-economic hazards and impacts of space weather: The important range between mild and extreme // *Space Weather*. V. 13. № 9. P. 524–528. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015SW001252>
- Tsurutani B.T., Goldstein B.E., Smith E.J., Gonzales W.D., Tang F., Akasofu S.I., Anderson R.R. The interplanetary and solar causes of geomagnetic activity // *Planet. Space Sci.* V. 38. № 1. P. 109–126. 1990. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(90\)90010-N](https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90010-N)
- Yamazaki Y., Matzka J., Stolle C., Kervalishvili G., Rauberg J., Bronkalla O., Morschhauser A., Bruinsma S., Shprits Y.Y., Jackson D.R. Geomagnetic activity index Hpo // *Geophys. Res. Lett.* V. 49. № 10. 2022. <https://doi.org/10.1029/2022GL098860>
- Yenén S.D., Gulyaeva T.L., Arikán F., Arikán O. Association of ionospheric storms and substorms of Global Electron Content with proxy AE index // *Adv. Space Res.* V. 56. № 7. P. 1343–1353. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.025>

Correspondence of Variations of *AE* and *Apo* Indices in 23–24 Solar Cycles

T. L. Gulyaeva^{1, *}

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*

**e-mail: gulyaeva@izmiran.ru*

The auroral electrojet index *AE* is often used in forecasting models as a characteristic of a source of the disturbance propagation in the geosphere from the pole to middle and low latitudes. However, these data are no longer available digitally since January 2020. Instead of the *AE*-index, we suggest using the recently introduced 1 h *Apo*-index, given the close proximity of magnetometer networks for these indices at high latitudes and the availability of the *Apo*-index in real time. To this end their correlation is analyzed during 276 intense storms for 1995–2017. Storm profiles are constructed by method of superposed epoch with zero epoch time $t_0 = 0$ taken at the threshold value of $AE \geq 1000$ nT. A comparison is made of the storm profiles of $AE(t)$, $Apo(t)$, the interplanetary electric field $E(t)$ and the solar wind speed $V_{sw}(t)$ within 72 hours: 24 hours before the storm peak t_0 , and 48 hours after it. A good agreement is obtained between the sets $AE(t)$ and $Apo(t)$ with a correlation coefficient of 0.70. Comparison with the interplanetary parameters testifies on the correlation of $AE(t)$ and $Apo(t)$ with the electric field $E(t)$ but absence of their coupling with the solar wind speed $V_{sw}(t)$. A two-parametric formula is derived for dependence of the auroral electrojet index $AE(t)$ on the interplanetary electric field $E(t)$ and the geomagnetic $Apo(t)$ index for the geomagnetic storm forecasting. In the absence of $E(t)$ data, formulae for the dependence of $AE(t)$ on $Apo(t)$ is introduced for implementation in real time and the inverse dependence of $Apo(t)$ on $AE(t)$ for reconstruction of the 1 h *Apo*-index before 1995. Validation of the proposed models with data for 5 intense storms in 2018 has shown a close resemblance of the model with observation data of the *AE*-index with a high coefficient of determination R^2 ranging from 0.62 to 0.81.