УДК 550.3
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-307
ORCID: 0000-0003-4029-1298

РАСЧЕТ ИНДЕКСА AE(SME) В ДВУХ ПОЛУШАРИЯХ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ

А.Д. Микулец, Ю.В. Пенских, В.В. Мишин, В.Э. Капустин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, mikulez@iszf.irk.ru

CALCULATION OF THE AE(SME) INDEX IN TWO HEMISPHERES OF THE EARTH USING THE MAGNETOGRAM INVERSION TECHNIQUE

A.D. Mikulets, Yu.V. Penskikh, V.V. Mishin, V.E. Kapustin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, mikulez@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе исследуется возможность восстановления индекса авроральных электроджетов *AE* (*SME*) по данным о продольных и эквивалентных токах в авроральной ионосфере. Актуальность задачи обусловлена отсутствием индекса авроральных электроджетов для Южного полушария. На основе карт распределения токов, полученных техникой инверсии магнитограмм (ТИМ), рассчитаны разности максимального и минимального значений эквивалентной токовой функции (δЭТФ) и продольных токов (δПТ), а также определены уравнения их зависимости от *SME*. Полученное линейное уравнение SME_{model} применено для прогноза *SME* в Южном полушарии. Сравнение смоделированного южного индекса с реальным северным *SME* показало схожую динамику ($r = 0.87$) при соотношении амплитуд SME_{model} / *SME* = 0.77). Результаты подтверждают перспективность использования техники ТИМ для мониторинга авроральной активности в обоих полушариях.

Ключевые слова: индекс *AE*, продольные и эквивалентные токи, определение южного *AE*-индекса.

Abstract. We study the possibility of calculating the auroral electrojet index *AE (SME)* by field-aligned and equivalent currents in the auroral ionosphere. The relevance of the problem is due to the lack of an auroral electrojet index calculated for the Southern Hemisphere. Based on current distribution maps obtained using the magnetogram inversion technique (MIT), we calculated the differences between the maximum and minimum values of the equivalent current function (δECF) and field-aligned currents (δFC), and determined the equations for their dependence on *SME*. The resulting linear equation SME_{model} is used to predict *SME* in the Southern Hemisphere. A comparison of the modeled southern index with the actual northern *SME* showed similar dynamics (r = 0.87) and an amplitude ratio of SME_{model} /*SME* = 0.77. The results confirm the potential of using MIT for monitoring auroral activity in both hemispheres.

Keywords: AE index, field-aligned and equivalent current, determination of the southern AE index.

ВВЕДЕНИЕ

Индекс авроральных электроджетов (*AE*) рассчитывается на основе данных 12 наземных магнитометров, расположенных в авроральных широтах. Он отражает величину восточного и западного электроджета [Davis, Sugiura, 1966; Weygand et al., 2014]. Во время сильных суббурь экваториальная граница продольных токов зоны 2 может смещаться на средние широты, вплоть до широты 42° геомагнитных координат [Mishin et al., 2018]. В результате авроральные электроструи опускаются ниже станций, данные которых используются для определения *AE*-индекса [Lockwood, 2018], что приводит к занижению *AE*-индекса [Bergin et al., 2020]. По этой причине мы используем *SME*-индекс — аналог *AE*-индекса, рассчитанный по данным более чем 100 станций [Newell, Gjerloev, 2011].

В Южном полушарии (ЮП) находится значительно меньшее количество магнитометров, а их текущая конфигурация не позволяет напрямую строить аналогичные *AE*- и *SME*-индексы в ЮП. Можно использовать другой способ — использовать токи в южной авроральной области для нахождения индекса *SME* в ЮП. Для расчета этих токов применяется расширенная техника инверсии магнитограмм (ТИМ). Она обеспечивает расчет в высотной ионосфере двумерных карт распределений эквивалентных токовых функций (ЭТФ) и продольных токов (ПТ) в обоих полушариях [Лунюшкин, Пенских, 2019]. Получаемые токовые карты послужат основой для расчета индекса *SME* в двух полушариях Земли (рис. 1).

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ SME И ТОКАМИ

Для отражения величины авроральных электроструй можно выбрать какую-то простую оценочную функцию: разницу максимумов и минимумов эквивалентного (δЭТФ), разницу максимумов и минимумов продольных (δПТ) токов и т.п. Эти точки минимума и максимума связаны с границей обращения конвекции [Лунюшкин, Пенских, 2019]. Коэффициенты корреляции *SME* с δЭТФ и *SME* с δПТ оказались примерно одинаковыми: $r \approx 0.88$. Высокий коэффициент корреляции предполагает, что можно использовать простую линейную модель.

На основе пяти суток 2015 г. с геомагнитными возмущениями были получены уравнения:

$$SME_{model} = 0.26\,\delta\text{ПТ} + 13.46. \quad (1)$$

$$SME_{model} = 0.87\,\delta\text{ЭТФ} + 56.27. \quad (2)$$

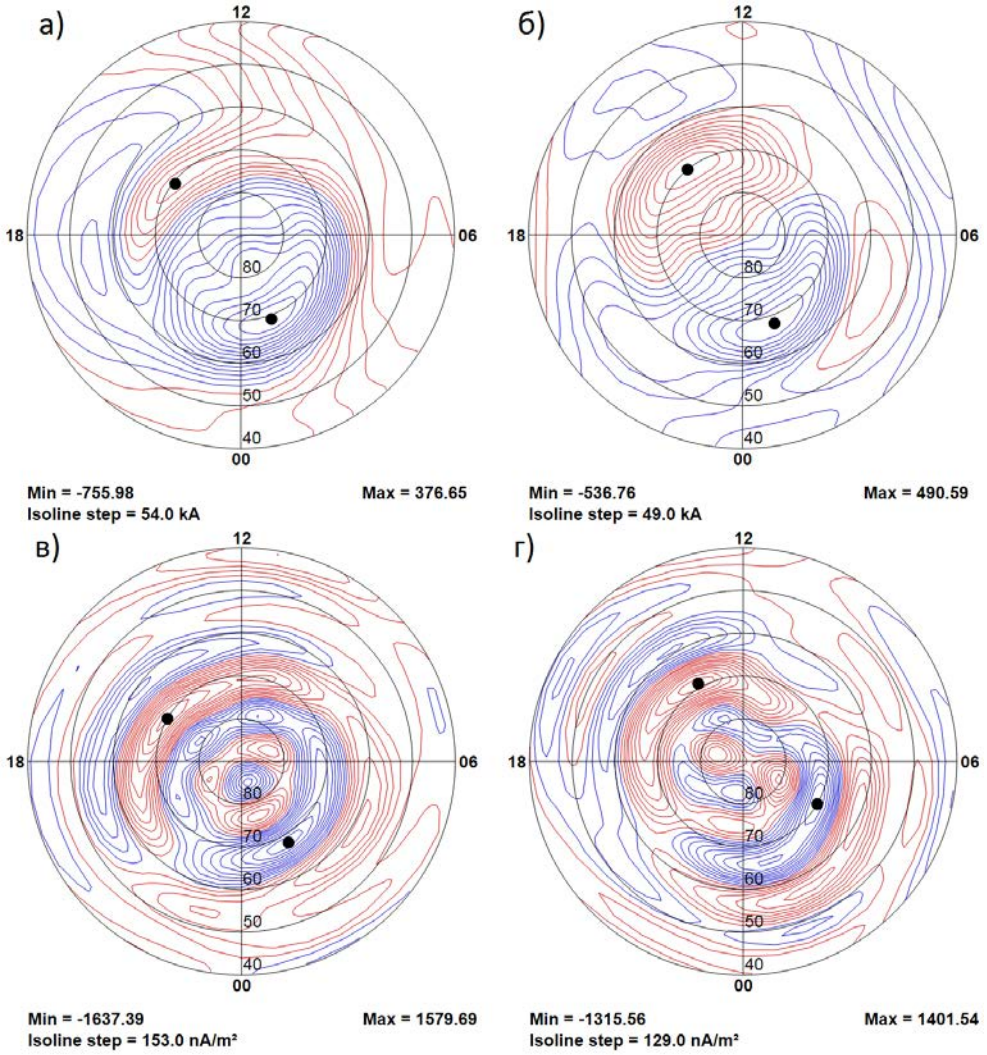

Рис. 1. 14:58 UT 11.09.2015. Карты распределений: *а* — ЭТФ в СП; *б* — ЭТФ в ЮП; *в* — ПТ в СП; *г* — ПТ в ЮП. Красные изолинии — положительные значения, синие – отрицательные. Черными точками обозначены положения минимумов и максимумов

Аналогично (1) (2) были получены квадратичные модели. Погрешности моделей приведены ниже (табл. 1). Видно, что добавление квадратичного элемента слабо влияет на точность. Относительные и среднеквадратичные ошибки моделей, построенных по δПТ, меньше, чем по модели δЭТФ. По этой причине далее будем использовать модель заданную уравнением (1).

Средние относительные и средние квадратичные ошибки моделей рассчитывались по формулам:

$$\varepsilon = \frac{1}{n}\sum_i^n \left|\frac{SME_i - SME_{model_i}}{SME_i}\right|,$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_i^n \left(SME_i - SME_{model_i}\right)^2}.$$

РАСЧЕТ ИНДЕКСА *SME* В ЮЖНОМ ПОЛУШАРИИ

Предположим, что зависимость между *SME* и δПТ в СП описывается так же, как и в ЮП. В таком случае полученное ранее уравнение (1) *SME* для СП можно использовать для предсказания *SME* в ЮП (рис. 2).

Из (рис. 2) видно, что *SME*, $SSME_{\text{model}}$ и $NSME_{\text{model}}$ имеют схожую динамику. Среднее отношение $SSME_{\text{model}}$ к *SME* равно 0.77, а коэффициент корреляции между $SSME_{\text{model}}$ и *SME* равен 0.87, что согласуется с результатами работ [Maclennan et al., 1991; Weygand et al., 2014].

Таблица 1. Оценка точности уравнений регрессии при восстановлении *SME* на основе δПТ и δЭТФ. Средние относительные (ε) и средние квадратичные (RMSE) ошибки методов линейной (L) и квадратичной (Q) регрессии

	δПТ	δЭТФ
ε_L	0.26	0.41
ε_Q	0.25	0.39
$RMSE_L$, нТл	242.58	244.05
$RMSE_Q$, нТл	230.99	232.94

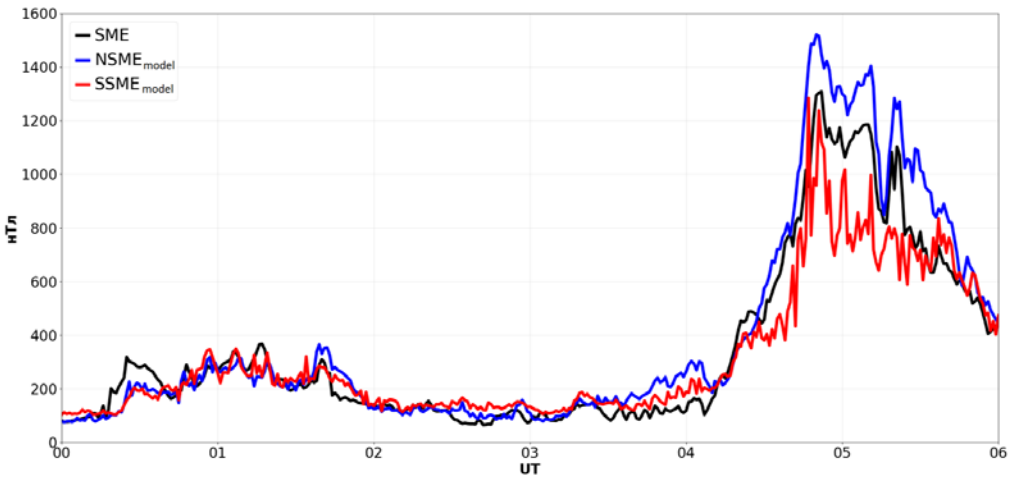

Рис. 2. *SME*-индекс для 11.09.2015, полученный по измерениям, а также рассчитанный по северному ($NSME_{model}$) и по южному ($SSME_{model}$) δПТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В авроральной зоне для каждого момента времени определены величины δЭТФ и δПТ. Показано, что оба этих параметра имеют хорошую линейную связь с *SME*-индексом: коэффициент корреляции равен 0.88.

Получены уравнения, связывающие *SME* с δПТ и δЭТФ (SME_{model}), приведены ошибки этих аппроксимаций. Полученное уравнение SME_{model} = 0.26·δПТ + 13.46 было использовано для расчета *SME* в ЮП по значениям тока ЮП. Среднее отношение южного SME_{model} к северному *SME* составило 0.774. Полученная численная оценка межполушарной асимметрии авроральной активности согласуется с существующей оценкой [Maclennan et al., 1991; Weygand et al., 2014].

Таким образом, на основе токовых карт ТИМ предложен численный метод восстановления SME в ЮП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (субсидия №075-ГЗ/Ц3569/278).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лунюшкин С.Б., Пенских Ю.В. Диагностика границ аврорального овала на основе техники инверсии магнитограмм // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5, № 2. С. 97–113. DOI:10.12737/szf-52201913.

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 Phys. 2020.V. 125, N 5, e2020JA027828. DOI:10.1029/2020ja027828.

Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations // J. Geophys. Res. 1966. V. 71, N 3. P. 785–801. DOI:10.1029/JZ071i003p00785.

Lockwood M., Owens M.J., Barnard L.A., et al. Space climate and space weather over the past 400 years: 2. Proxy indicators of geomagnetic storm and substorm occurrence // J. Space Weather Space Clim. 2018. V. 8, A12. DOI: 10.1051/swsc/2017048.

Maclennan C.G., Lanzerotti L.J., Akasofu S.-I., et al. Comparison of “Electrojet” Indices from the northern and southern hemispheres // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1991. V. 96, N A1. P. 267–274. DOI:10.1029/90ja01366.

Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Mikhalev A.V., et al. Extreme geomagnetic and optical disturbances over Irkutsk during the 2003 November 20 superstorm // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. 2018. V. 181. P. 68–78. DOI:10.1016/j.jastp.2018.10.013.

Newell P.T., Gjerloev J.W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2011. V. 116, N A12, A12211. DOI:10.1029/2011ja016779.

Weygand J.M., Zesta E., Troshichev O. Auroral electrojet indices in the Northern and Southern Hemispheres: A statistical comparison // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119, N 6. P. 4819–4840. DOI:10.1002/2013ja019377.