

УДК 550.388.2

ДРЕЙФ ЮЖНО-АТЛАНТИЧЕСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SAMPEX ЗА ПЕРИОД С 1993 ПО 2004 ГОД

Григорян О.Р., Петров А.Н.

DRIFT OF SOUTH ATLANTIC MAGNETIC ANOMALY FROM SAMPEX DATA FOR THE PERIOD OF 1993–2004

Golygin V.A., Vdovin E.M., Palamarchuk K.S., Sazhin V.I.

По данным прибора LICA на борту ИСЗ SAMPEX (высота около 600 км) исследовано, как сдвинулся центр южно-атлантической магнитной аномалии (ЮАА). Положение центра определялось по максимуму потока низкоэнергичных захваченных протонов и электронов ($E_p > 770$ кэВ и $E_e > 600$ кэВ) а также по минимуму модуля магнитного поля. Методом определения центра масс получены положения центра ЮАА как по заряженным частицам, так и по магнитному полю. По максимуму потока заряженных частиц получена оценка скорости дрейфа ЮАА в западном направлении 0.16 градуса в год, в северном направлении 0.08 градуса в год. По минимуму магнитного поля получена оценка скорости дрейфа ЮАА в западном направлении 0.35 градуса в год, в южном направлении 0.08 градуса в год. Результаты могут быть использованы при разработке моделей радиационных поясов следующего поколения.

Введение

Низковысотные орбитальные космические аппараты (с высотой апогея до ~1000 км) получают в зоне южно-атлантической магнитной аномалии (ЮАА) значительную дозу радиации, знание, как распределены потоки частиц в ЮАА, как они варьируются, важно с прикладной точки зрения. За последние 150 лет изучения этого вопроса было обнаружено, что существует постоянный дрейф элементов геомагнитного поля, направленный на запад [1–3]. Определенная в нескольких работах [4–6] скорость дрейфа ЮАА составляет от 0.1 до 1.0 °г. в западном направлении.

Характеристики эксперимента

В данной работе исследуются вариации потоков заряженных частиц по данным прибора LICA и показаниям штатного магнитометра на борту спутника SAMPEX. Орбита спутника круговая, приполярная, высота около 600 км. Использовались данные с http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cdaweb/sp_phys/ за четыре месяца в конце 1992 – начале 1993 г. и четыре месяца в начале 2004 г. Смесь протонов с энергией >770 кэВ и электронов с энергией >600 кэВ регистрировалась каждые 30 с. Прибор представлял собой времяпролетный масс-спектрометр, закрытый двумя слоями никелевой фольги толщиной 0.75 мкм каждый. Поле обзора составляло $17^\circ \times 21^\circ$. Ориентация спутника была такова, что вблизи экватора регистрировались заряженные частицы с питч-углами, близкими к 90° [7].

Методика определения положения максимума. Положение максимума потока заряженных частиц в ЮАА

Для локализации максимума потока заряженных частиц в ЮАА были построены зависимости потока от географической широты и долготы. Из всех данных были вырезаны прямоугольные области с широтой от -50° до 0° и долготой от 270° до 360° . Для примера на рис. 1 показана зависимость потока от широты для 1992 г. Аналогичные зависимости получаются и для 2004 г. и для зависимости потока от долготы. Из этого рисунка очевидно, что определить положение максимума потока с достаточно большой точностью непросто. В области максимального потока количество измерений невелико, поэтому нельзя

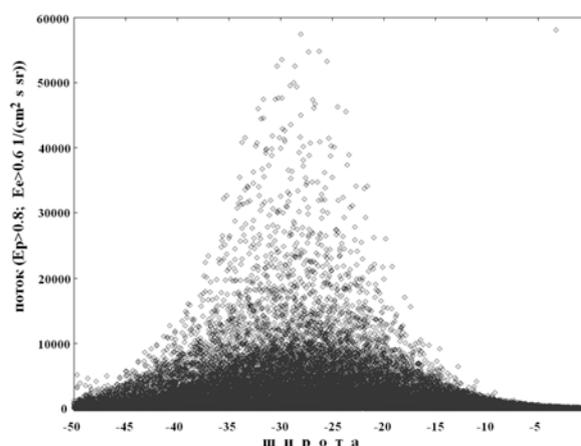


Рис. 1. Зависимость потока от географической широты по данным SAMPEX для 1992 г.

считать, что настоящий центр аномалии находится там же, где обнаружен максимум потока в вышеописанной выборке экспериментальных данных, итребуется специальная математическая обработка данных.

Для оценки положения максимума такого типа распределений используется так называемое взвешенное среднее значение \bar{x}_j [8]. Если имеется набор пар величин x_i (координата, широта или долгота) и j_i (поток), который является весом для величины x_i , то взвешенное среднее значение координаты будет равно

$$\bar{x}_j = \frac{\sum_i x_i j_i}{\sum_i j_i}, \quad (1)$$

а его дисперсия равна

$$\sigma^2 = \frac{\sum_i j_i^2}{\left(\sum_i j_i\right)^2}, \quad (2)$$

где σ – стандартное отклонение величины x . Формула (1) в случае, когда j_i равно массе частицы, а x_i – ее координатам, дает выражение для центра масс системы частиц.

Описанная выше процедура дает удовлетворительную точность, однако на величину погрешности влияет объем и качество выборки исходных экспериментальных данных. Дело в том, что, если процедуре, описанной формулами (1) и (2), подвергнуть все экспериментальные данные, даже с выборкой по широте и долготе, большое количество измерений, в которых наблюдается малый поток на окраинах ЮАА, смещает вычисленное положение центра в сторону от истинного, а большие, но редко встречающиеся потоки вблизи истинного центра слабо влияют на средние (1) и (2). Поэтому требуется отбор экспериментальных данных. Можно брать не все потоки, встречающиеся в указанном выше прямоугольнике, а все, что превышают по величине некоторый порог. Тогда при малых значениях порога роль низких потоков будет значительной, но по мере увеличения порога вычисленное положение центра будет все ближе к истинному. Однако порог нельзя увеличивать слишком сильно, потому что при этом становится существенным разброс и случайные флуктуации в экспериментальных данных, поскольку объем выборки при больших порогах очень мал. Последняя процедура, которую необходимо провести над экспериментальными данными, это нормировка потока на максимальное значение. Дело в том, что максимальная величина потока в ЮАА изменяется из-за геомагнитных условий, положения момента измерения в солнечном цикле, ориентации детекторов спутника и некоторых других факторов. Вследствие этого максимальная величина потока в 1992 г. для регистрируемой смеси заряженных частиц составляла $6 \cdot 10^4$ (см² с стер) –1, а в 2004 г. $1.6 \cdot 10^5$ (см² с стер) –1. Во избежание трудностей с интерпретацией поток был нормирован на максимальное значение.

Полученные результаты показаны на рис. 2. В тех точках, где погрешность определения положения центра оказалась меньше размеров точки, погрешность не указана. Из рисунка видно, что вклад низких потоков в среднее значение существенен для величины порога до 0.6, точки, где кривые, соответствующие 1992 и 2004 г., пересекаются. Выше этой точки кривые идут приблизительно параллельно до величины порога 0.8, после чего расходятся из-за флуктуаций экспериментальных данных. На интервале порогов от 0 до 0.6 вычисленное положение центра ЮАА зависит от порога из-за несимметричности, отличия в форме «склонов» ЮАА на западе (крутой) и востоке (пологий). Интервал порогов от 0.6 до 0.8, где кривые на рис. 2 параллельны и направлены вертикально вверх, исходя из этого считается наиболее подходящим для установления точного положения центра аномалии. Полученные координаты и их погрешности показаны в табл. 1.

Таблица 1

Положение центра ЮАА в 1992 и 2004 годах, определенное разными методами.

год	по максимуму потока		по минимуму поля	
	широта	долгота	широта	долгота
1993	-28.77±0.15	313.00±0.50	-21.919±0.006	312.743±0.016
2004	-27.92±0.72	311.16±0.90	-22.795±0.007	308.776±0.016

Из рис. 2 следует, что ЮАА с 1992 по 2004 г. дрейфовала не более чем на два градуса по долготе,

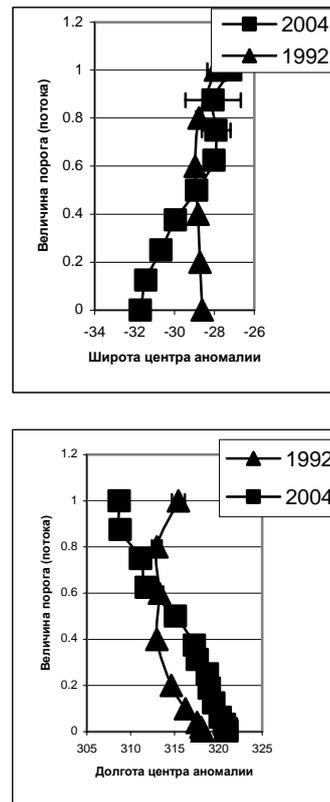


Рис. 2. Положение центра ЮАА в 1992 и 2004 гг. в зависимости от величины порога. Данные SAMPEX по потоку протонов с энергией >770 кэВ и электронов с энергией >600 кэВ.

поэтому вышеописанная процедура статистической обработки была необходима.

Положение минимума геомагнитного поля в области ЮАА

Для определения положения минимума геомагнитного поля в области ЮАА использовалась та же методика, что описана в предыдущем разделе. Для поиска минимума В мы воспользовались той же методикой и теми же программами, изменив знак, сделав замену $V \Rightarrow -V$. Кроме того, необходимость в процедуре нормировки отсутствовала, поскольку вариации напряженности геомагнитного поля (не более чем 10^3 нТл) в десятки раз меньше по сравнению с полем на экваторе вблизи Земли ($3 \cdot 10^4$ нТл). Полученный результат представлен на рис. 3. Вследствие малых флуктуаций поля, о которых уже упоминалось выше, погрешность в определении положения центра оказалась меньше размеров точки на рис. 3 и потому не показана. Интерпретация рис. 3 схожа с той, что описана в предыдущем разделе. Так, нас не будут интересовать значения В от 0.25 до 0.22, поскольку они относятся не к внутренним областям ЮАА. Аналогично, нельзя пользоваться и данными по В от 0.19 и меньше из-за малого количества точек в выборке экспериментальных данных. Исходя из этих соображений, был выбран интервал порогов 0.19–0.20 и определено положение минимума поля в 1992 и 2004 гг. Полученные координаты и их погрешности показаны в табл. 1.

Определение долготной и широтной скорости дрейфа ЮАА

Временной интервал, который рассматривается в настоящей работе, составляет 11.2 г. с погрешностью 0.1, которая определяется приблизительно как отношение длительности одного месяца к году. С учетом этой погрешности и погрешности определенного положения центра аномалии была рассчитана скорость дрейфа ЮАА по долготе и широте. Полученные результаты показаны в первой и третьей строках табл. 2.

Таблица 2.

Скорость дрейфа ЮАА в направлении на запад и на север, определенная разными методами, °/год.

	По максимуму потока	По минимуму поля
На запад	0.162±0.094	0.354±0.004
На запад, [5]	0.29	0.18
На север	0.075±0.066	-0.078±0.001

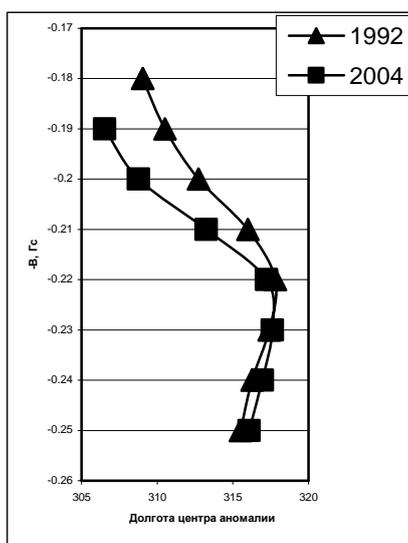
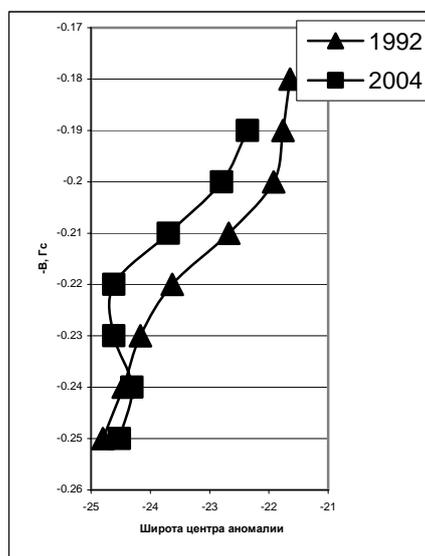


Рис. 3. Положение центра ЮАА в 1992 и 2004 гг. по данным о геомагнитном поле. Данные штатного магнитометра SAMPEX.

Обсуждение

Из табл. 1 можно заметить, что положения центра ЮАА, определенные методом поиска максимума потока и минимума поля, не совпадают. То, что минимум поля находится ближе к экватору, чем максимум потока протонов энергии >50 МэВ, отмечалось и в работе [5]. Сообщалось, что положение максимума потока зависело от энергии частиц: чем больше энергия захваченных частиц, тем ближе максимум их потока находился к минимуму геомагнитного поля, что, конечно, не является удовлетворительным объяснением, поскольку, исходя из общей (и подтвержденной неоднократно) теории адиабатического движения захваченных частиц, максимум потока частиц обязательно должен наблюдаться в месте, где наблюдается минимум магнитного поля. Однако, существуют и работы [9], в которых различий в положении максимума потока протонов энергии >50 МэВ и минимума поля не обнаружено.

Обнаруженная в настоящей работе скорость дрейфа в западном направлении хоть и отличается от результатов, представленных в [5] (0.1–1.0 °/год, см. там же).

По представленным здесь данным подтвердить или опровергнуть наличие дрейфа ЮАА в широтном направлении сложно. Во-первых, определенная скорость дрейфа по максимуму потока 0.075 ± 0.066 °/год имеет значительную погрешность, хотя и не противоречит ранее опубликованным данным, во-вторых, из-за того, что по данным по магнитному полю ЮАА дрейфует не на север, а на юг примерно с той же скоростью 0.078 ± 0.001 °/год. В работе [10] сообщалось о значительной скорости дрейфа ЮАА на север, однако этот результат не подтверждается ни по нашим данным, ни по данным [4, 5, 6], где сообщается, что скорость дрейфа в северном направлении составляет приблизительно 0.05 – 0.1 °/год (рис. 4). Возможное объяснение такого противоречия состоит в том, что в [10] широтный дрейф обнаружен по данным по потокам электронов с энергией >300 кэВ, в то время как по протонам широтный дрейф обнаружен не был.

Полученные в нашей работе противоречивые данные о скорости широтного дрейфа по потокам частиц и магнитному полю не позволяют надежно подтвердить наличие этого дрейфа. Можно лишь сказать, что скорость этого дрейфа по нашим данным не превышает 0.1 °/год.

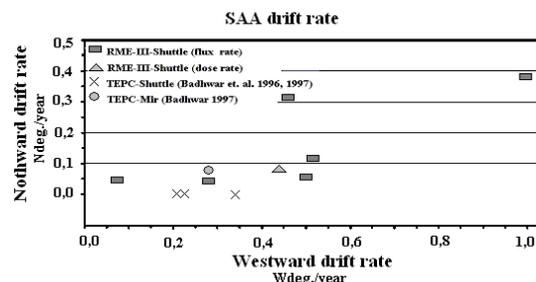


Рис. 4. Скорость дрейфа ЮАА по данным нескольких экспериментов [11].

Выводы

В результате обработки данных космического эксперимента на борту спутника SAMPEX, в котором регистрировалась смесь протонов с энергией >770 кэВ и электронов с энергией >600 кэВ за период с 1992 по 2004 г. получено следующее:

1. Южно-атлантическая аномалия дрейфует на запад. Скорость этого дрейфа по данным по максимуму потока заряженных частиц составляет 0.162 ± 0.094 °/год, а по данным по минимуму магнитного поля 0.354 ± 0.004 °/год.
2. Скорость дрейфа южно-атлантической аномалии в широтном направлении значительно меньше скорости по долготе. Скорость этого дрейфа не превышает 0.1 °/год.

Авторы работы выражают благодарность А.А. Жукову за идею использовать формулы для взвешенного среднего и В.В. Ромашовой за обработку данных и подготовительную работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yukutake T., Tachinaka, H., The westward drift of the magnetic field of the Earth // Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokio. 1962. V. 40, P. 1–65.
2. Bucha V., Suess H. E. Evidence for changes in the Earth's magnetic field intensity // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 1970. N. 269. V. 1193. P. 47–55/
3. Courtillot V., Le Mouel J.L. Time Variations of the Earth's Magnetic Field: From Daily to Secular // Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 1988. V. 16, P. 389–476, [doi:10.1146/annurev.ea.16.050188.002133](https://doi.org/10.1146/annurev.ea.16.050188.002133)

4. Badhwar G.D. Drift rate of the South Atlantic Anomaly // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 2343–2350.
5. Heynderickx D., Comparison between methods to compensate for the secular motion of the South Atlantic Anomaly // Rad. Meas. 1996. V. 26. P. 369–373.
6. Sakaguchi T., Doke T., Hasebe N., et al. Measurement of the directional distribution of incident particles in the Shuttle-Mir mission orbit, J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 22793–22799.
7. Mason G. M., et al. LEICA: A Low Energy Ion Composition Analyzer for the study of solar and magnetospheric heavy ions // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1993. N. 31. V. 3. 549 p.
8. Худсон Д., Статистика для физиков: лекции по теории вероятностей и элементарной статистике. М.: Мир, 1970.
9. Grigoryan O.R., Petrov A.N., Romashova V.V. Bengin V.V., About the SAA drift // WDS'05 Proc. of Contributed Papers, Part II, 251-256, 2005.
10. Grigoryan O.R., Romashova V.V., Petrov A.N. SAA drift: Experimental results, Adv. Space Res., [doi:10.1016/j.asr.2007.02.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.02.015), 2007.
11. Golightly M.J., Weyland M.D., Johnson A.S., Semones E. Twenty-Years of Radiation Measurements in Low Earth: what have we learned? // The 6th WRMISS Workshop. Jesus College. Oxford. England. September 12–14. 2001. (<http://www.oma.be/WRMISS/workshops/sixth/workshop.html>)

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва