

УДК 551.510.535

ИЗМЕНЕНИЕ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПРИ СМЕЩЕНИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ (ОЦЕНКИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ)

© 2025 г. А. Н. Ляхов*, Ю. И. Зецер

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: alyakhov@idg.ras.ru*

В статье представлены результаты экспериментальной проверки гипотезы о механизме влияния смещения магнитных полюсов Земли на ее ионосферу. В предыдущих работах предполагалось сохранение пространственно-временной структуры зоны высыпаний энергичных частиц из магнитосферы в ионосферу в геомагнитных координатах, а ее смещение в географических координатах рассматривалось как механизм влияния векового хода геомагнитного поля на верхние геосферы. В данной работе вышеуказанная рабочая гипотеза проверена с использованием экспериментальных данных регистрации потоков высыпающихся частиц на Искусственном спутнике Земли (ИСЗ) серии DMSP за период 1983–2016 гг. В статье представлены результаты анализа смещения экваториальной границы аврорального овала в американском и сибирском секторах и положение гипоцентра аврорального овала. Результаты показали, что в наблюдательных данных в американском секторе присутствует слабый тренд северного направления, который меньше, чем наблюдаемое смещение магнитного полюса.

Ключевые слова: магнитный полюс, высыпания, авроральный овал.

Для цитирования: Ляхов А.Н., Зецер Ю.И. Изменение аврорального овала при смещении магнитных полюсов Земли (оценки по экспериментальным данным) // Динамические процессы в геосферах. 2025. Т. 17. № 1. С. 49–56. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_1_49

Введение

В последние десятилетия внимание многих исследователей привлекло наблюдаемое в настоящее время быстрое изменение положения магнитных полюсов Земли [Зверева, 2012]ⁱ, сопровождаемое заметным уменьшением дипольного магнитного момента. В 1980 г. координаты Северногоⁱⁱ магнитного полюса – 76°9' с. ш., 101°7' з. д. и величина магнитного момента была $7.91 \cdot 10^{22}$ А/м². В 2025 г. наблюдаются следующие значения: 85°8' с. ш., 138°1' в. д., $7.70 \cdot 10^{22}$ А/м² соответственно. Хорошо видно, что за 45 лет координаты магнитного полюса претерпели сильное смещение, со сменой полушарий с западного на восточное. Этот процесс движения со скоростью до 50 км/год некоторыми исследователями рассматривается как начало процесса смены полярности магнитного поля Земли – процесс, неоднократно происходивший в прошлом [Lowrie, 1983].

Морфология наблюдаемого изменения геомагнитного поля в современном виде началась с пионерской работы [Mandea, Dormy, 2003]. В этой работе впервые, с привлечением спутниковых данных, было детально картировано магнитное поле в окрестностях северного и южного полюсов и установлена асимметрия их динамики. Южный магнитный полюс движется значительно медленнее. В работе [Mandea et al., 2020] приведены обновленные данные по положению полюсов и указано на то, что северный магнитный полюс вступил в фазу торможения. Вместе с тем, на сегодня невозможно утверждать, что процесс глобальной перестройки геомагнитного поля остановился, или пошел в обратном направлении, так как отсутствует изменение тренда магнитного момента диполя.

Оставляя за рамками данной статьи обсуждение гипотез о природе смещения магнитных полюсов, механизме смены полярности геомагнитного поля и времени, которое необходимо на этот процесс,

ⁱ <https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>

ⁱⁱ В статье термин Северный относится к магнитному полюсу, расположенному в Северном полушарии.

ограничимся указанием на последствия изменения положения магнитных полюсов для ионосферы. В работе [Ляхов и др., 2006] была предпринята первая попытка оценить влияние прогнозируемого на 2050 г. смещения магнитного полюса на структуру ионосферы. В рамках численного моделирования с помощью трехмерной самосогласованной модели СТМ было предсказано драматическое изменение структуры ионосферы в Северном полушарии. В работе [Ляхов и др., 2016] с помощью трехмерной самосогласованной модели TIE-GCM была предпринята попытка выполнить численный реанализ структуры верхней атмосферы и ионосферы на период 1980–2015 гг. В обеих работах на основе результатов численного моделирования был четко сформулирован физический механизм влияния изменений геомагнитного поля на структуру и динамику ионосферы. Этот механизм заключается в изменении фазового сдвига между солнечным и магнитным локальным временем. Величина этого сдвига сложным образом зависит от географических координат, меняясь вместе с изменением геомагнитного поля. Ионизация и нагрев верхней атмосферы солнечным УФ излучением определяются солнечным локальным временем и зенитным углом Солнца, в то время как ионизация и нагрев потоками высыпавшихся частиц определяются магнитным локальным временем [Hardy et al., 2008; Lin et al., 2014]. Эти процессы могут совпадать по фазе, отставать или быть в противофазе, влияя на состояние ионосферы и ее динамику. Величина фазового сдвига определяется положением магнитного полюса в рамках базовой гипотезы – пространственная структура высыпаний инвариантна в геомагнитных координатах, привязана к положению магнитного полюса и меняет свое положение в географических координатах вместе с положением полюсов.

Численные модели возможных эффектов в ионосфере, вызванных движением магнитных полюсов, рассматривались в работах [Cnossen, 2012; Zossi et al., 2019]. Общий обзор возможных геофизических эффектов представлен в работе [Mandea, 2020]. Результаты глобального трехмерного моделирования перестройки магнитосферы Земли в ходе смены полярности геомагнитного поля приведены в работе [Vogt et al., 2004]. В последней работе не изучался отклик ионосферы и термосферы, а в первых двух работах изучались достаточно тонкие физические эффекты, вызванные изменением глобальных дрейфов в ионосфере. В работе [Mandea, 2020] основное внимание уделяется возрастанию роли геомагнитно-индуцированных токов в средних широтах при смещении магнитного полюса в направлении средних широт. Во всех цитированных выше работах базовая гипотеза принимается явно или неявно. При этом остается вопрос: контролируется ли энерговод в атмосферу с потоками энергичных частиц положением магнитного полюса (испытывает быстрое смещение) или положением геомагнитного полюса (практически постоянен)? Для ответа на этот вопрос привлечем данные первичной регистрации потоков высыпавшихся электронов, измеренных на ИСЗ серии DMSP в 1983–2016 гг.

Исходные данные и методы их обработки

Для проверки базовой гипотезы мы воспользуемся доступными первичными измерительными данными спутников серии DMSP. Измерения на ИСЗ DMSP были начаты в 1983 г. и продолжаются по настоящее время. Все ИСЗ серии DMSP были оснащены детекторами высыпавшихся электронов и ионов SSJ4 (SSJ5 на поздних спутниках) в диапазоне 14 эВ–30 кэВ [Shumaker et al., 1988]. На ИСЗ последних серий добавлены измерения скорости дрейфа плазмы и электрических полей. Первичные данные позволяют идентифицировать границы зон высыпаний энергичных частиц в полярных зонах.

В нашем анализе мы использовали базу данных MADRIGALⁱⁱⁱ, содержащую рассчитанное по всему комплексу измерений географическое положение экваториальной границы аврорального овала. Секулярные вариации во втором наборе данных ранее исследовались в работе [Zossi et al., 2021], но с большим упором на поиск регрессионных зависимостей от геомагнитной активности. Авторы [Zossi et al., 2021] справедливо указывают на необходимость самосогласованного моделирования магнитосферно-ионосферной связи для понимания процессов формирования овала полярных сияний.

В данной работе мы ограничимся расчетами вероятностных характеристик для географической широты экваториальной границы аврорального овала в американском (1503Д-603Д) и сибирском

ⁱⁱⁱ <http://cedar.openmadriral.org>

(60ВД-150ВД) секторах. Выбранные секторы соответствуют направлениям «удаления» и «приближения» Северного магнитного полюса [Mandea, 2020].

Необходимо подчеркнуть, что переход к прямому расчету плотности вероятности избавляет от необходимости устранять тренды, связанные с солнечной активностью, как это делается в [Zossi et al., 2021]. Последняя задача является весьма сложной и неоднозначной. Опираясь вместо средних величин плотностью вероятности, мы автоматически учитываем факторы солнечной и геомагнитной активности в виде усиления «хвостов» распределения и возможного появления мультимодальности. Для примера, на рисунках 1 и 2 представлены плотности вероятности географической широты экваториальной границы аврального овала в американском секторе (150ЗД-60ЗД) для 1991 и 2014 гг. Из исходных данных отбирались только результаты, имеющие маркировку «best» или «good». Временная привязка наблюдений на DMSP позволила сформировать дополнительный вектор данных из среднесуточных значений A_p индекса (нТл) и индекса солнечной активности $F_{10.7}$ (10^{-22} Вт м⁻² Гц⁻¹). Расчет плотности вероятности выполнялся в системе MATLAB функцией *ksdensity*.

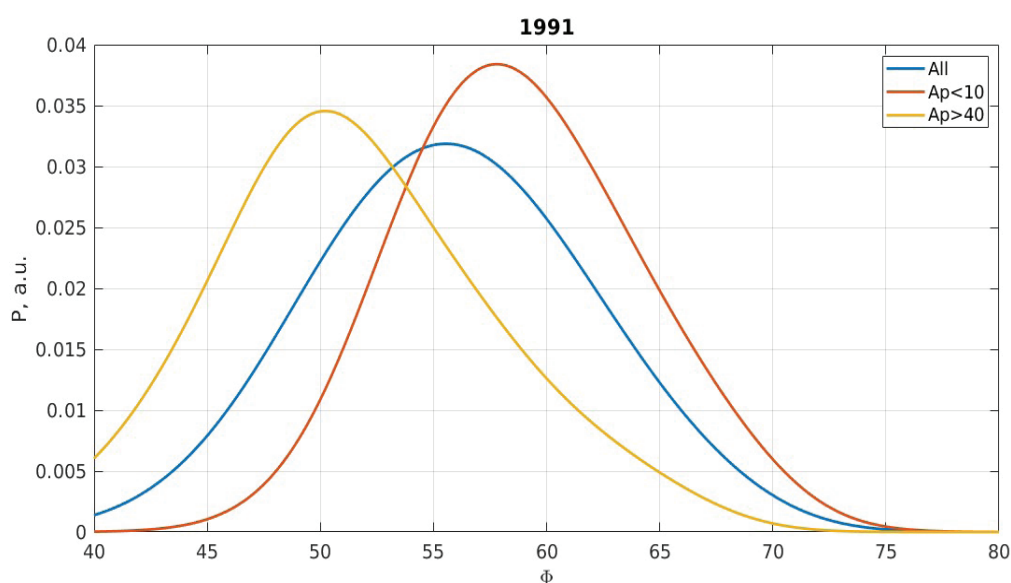


Рис. 1. Плотность вероятности широты экваториальной границы полярного овала в 1991 г.

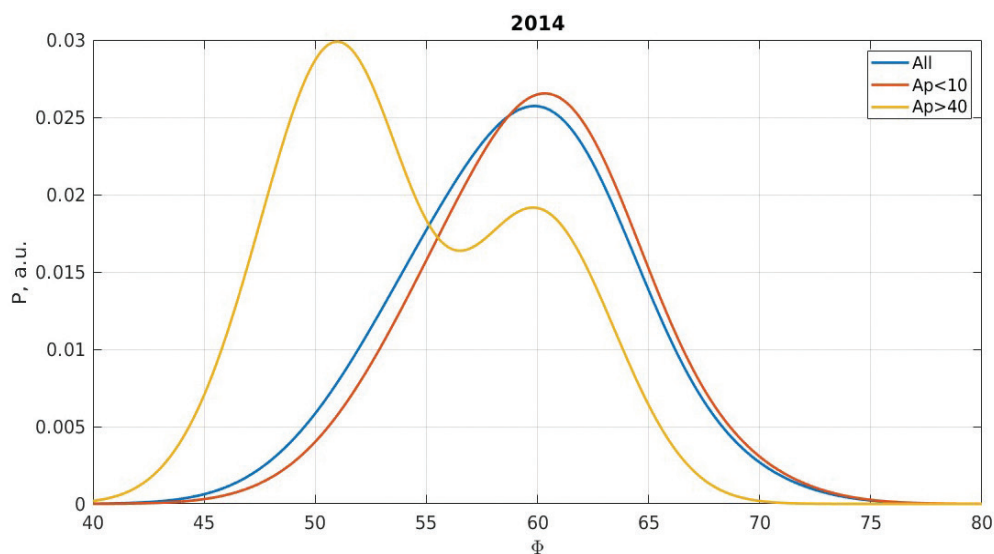


Рис. 2. Плотность вероятности широты экваториальной границы полярного овала в 2014 г.

Исходные данные были разбиты на три группы: все измерения, измерения в дни с $Ap < 10$ и дни с $Ap > 40$. Результаты расчета для 1991 г. показывают, что наиболее вероятным по всему банку данных, без разбивки по магнитному локальному времени, было значение широты $\sim 55^\circ$ с. ш. Для геомагнитно-спокойных дней ($Ap < 10$) граница сдвигается к северу на 2–3 градуса. Для геомагнитно-возмущенных дней ($Ap > 40$) граница смещается на 5 градусов к югу. Близость результатов по всему банку данных и по геомагнитно-спокойным дням объясняется малым статистическим весом геомагнитно-возмущенных дней. На рис. 2 это видно отчетливо: в 2014 г. данные для магнитоспокойных дней и для всего банка данных практически совпадают, а для возмущенных дней наблюдается мультимодальность.

Результаты обработки

Для каждого года в интервале 1983–2016 гг., доступных в базе данных MADRIGAL, был выполнен расчет плотности вероятности географической широты экваториальной границы аврорального овала. При обработке было выполнено дополнительное разбиение множества данных на «утренние» ($MLT < 12$) и «вечерние» ($MLT > 12$) часы по магнитному локальному времени. Результаты первого шага обработки представлены на рисунках 3 и 4 для американского сектора для геомагнитно-спокойных дней с $Ap < 12$. Визуально наблюдается нестационарный характер плотности вероятности и слабое смещение в высокие широты во времени.

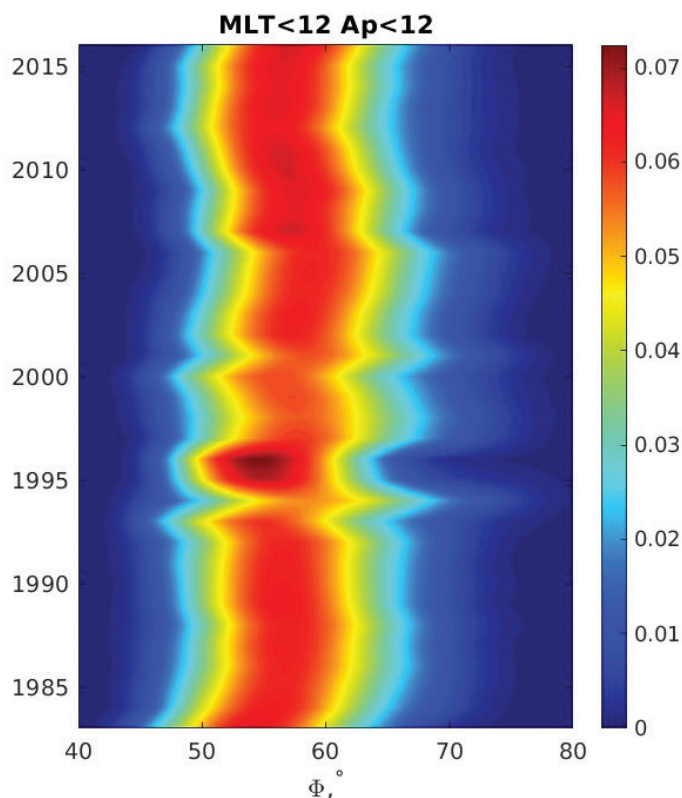


Рис. 3. Плотность вероятности широты экваториальной границы полярного овала в американском секторе для геомагнитно-спокойных дней и утренних значений MLT

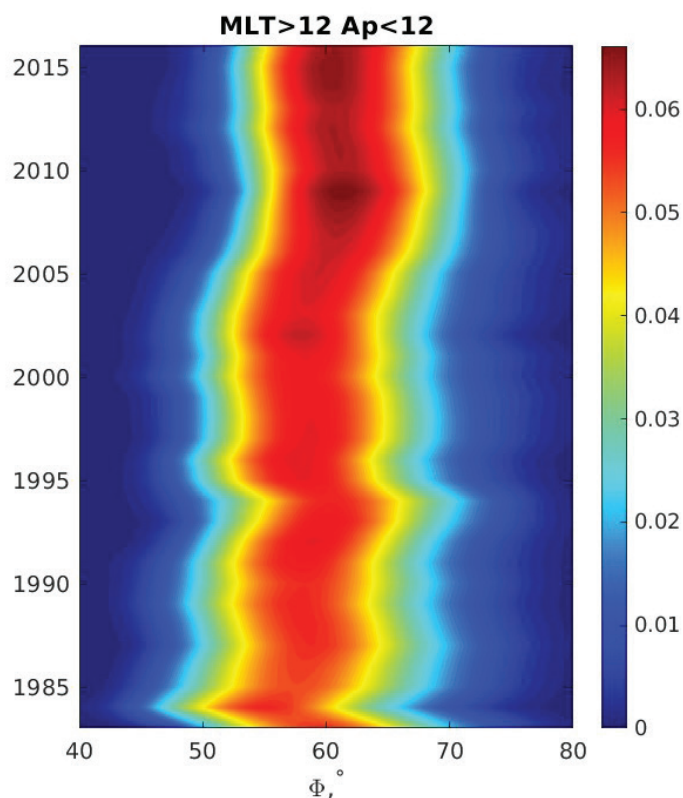


Рис. 4. Плотность вероятности широты экваториальной границы полярного овала в американском секторе для геомагнитно-спокойных дней и вечерних значений MLT

Далее, для каждого года определялась географическая широта, соответствующая максимуму плотности вероятности. Результаты представлены на рисунках 5 и 6 для американского и сибирского секторов соответственно. Сплошными линиями на рис. 5 и рис. 6 показана сплайн-аппроксимация по методу наименьших квадратов. Дополнительно на данных рисунках (черная линия, правая ось ординат) представлена временная динамика среднегодовых значений параметра $S = Ap^2/F_{10.7}$. Данный параметр

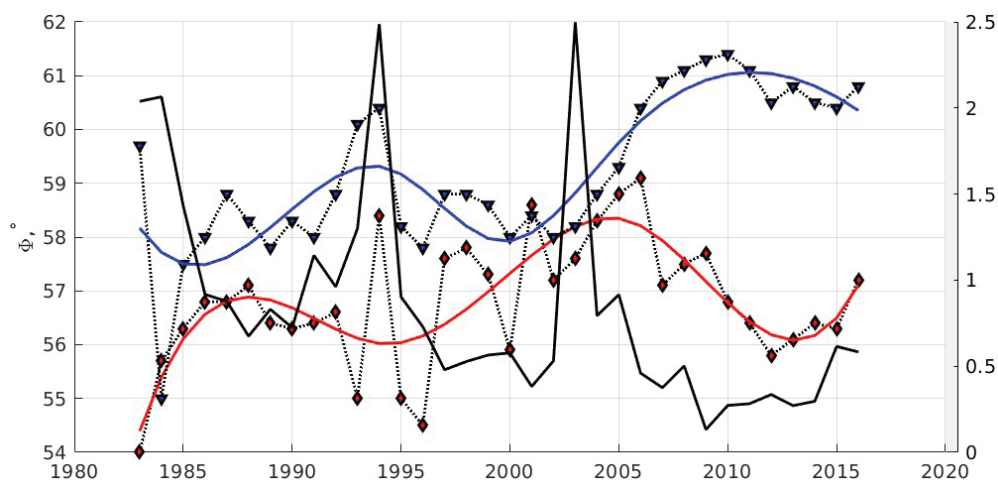


Рис. 5. Широта экваториальной границы полярного овала в американском секторе для геомагнитно-спокойных дней. Ромбики и красная линия – $MLT < 12$, треугольники и синяя линия – $MLT > 12$, сплошная черная линия и правая ось ординат – параметр S

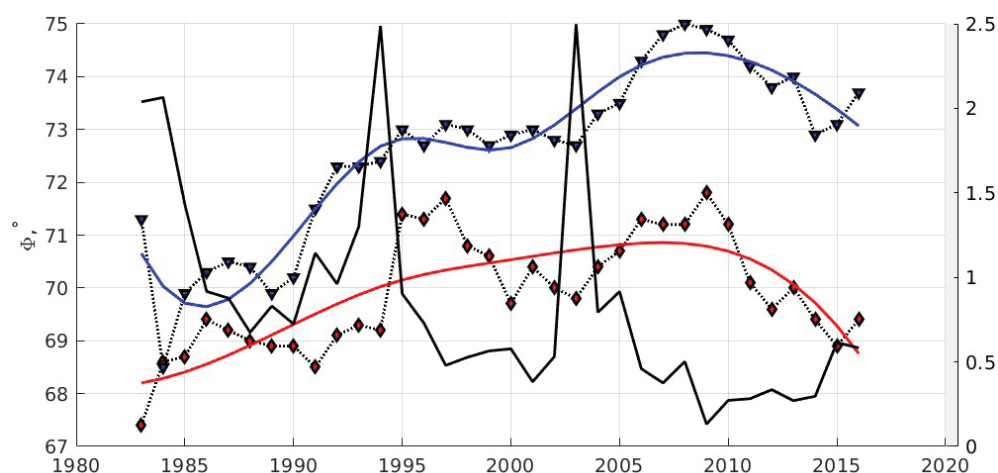


Рис. 6. Широта экваториальной границы полярного овала в сибирском секторе для геомагнитно-спокойных дней. Ромбики и красная линия – $MLT < 12$, треугольники и синяя линия – $MLT > 12$, сплошная черная линия и правая ось ординат – параметр S

с точностью до числовой константы, определяемой выбранной системой единиц, пропорционален отношению энергии магнитных вариаций к энергии солнечного излучения на длине волны 10.7 см, то есть является безразмерным параметром, характеризующим геофизические условия.

В американском секторе наблюдается нелинейный тренд смещения экваториальной границы на север. Смещение сильнее выражено для вечерних значений MLT . По абсолютной величине смещение наиболее вероятной широты экваториальной границы не превысило 3 градусов.

В сибирском секторе с 1983 по 2007 гг. наблюдается смещение к северу, в особенности в вечерние часы по MLT . Временная динамика в утренние часы по MLT скорее напоминает стохастический тренд. Однако для всех условий после 2007 г. направление тренда сменилось на смещение в южном направлении. Абсолютная магнитуа вариации наиболее вероятной широты экваториальной границы находится в пределах 3–4 градуса широты.

Отличительной особенностью данных DMSP, полученных в американском секторе, является резкий сдвиг экваториальной границы к северу в 1994 г., совпадающий с пиком в значении параметра S (рис. 5). Аналогичный пик в 2003 г. не вызвал заметного отклика в положении экваториальной границы.

Последним шагом в обработке данных DMSP стало построение траектории гипоцентра для всех точек (пары координат широта-долгота) экваториальной границы аврорального овала. Под гипоцентром понимается такая пара координат, при которой достигается минимум суммы квадратов расстояний до всех исходных точек границы. Результаты обработки представлены на рис. 7. Наиболее значительное смещение произошло в 2006 г., разделившем во времени существование двух зон квазислучайных блужданий положения гипоцентра.

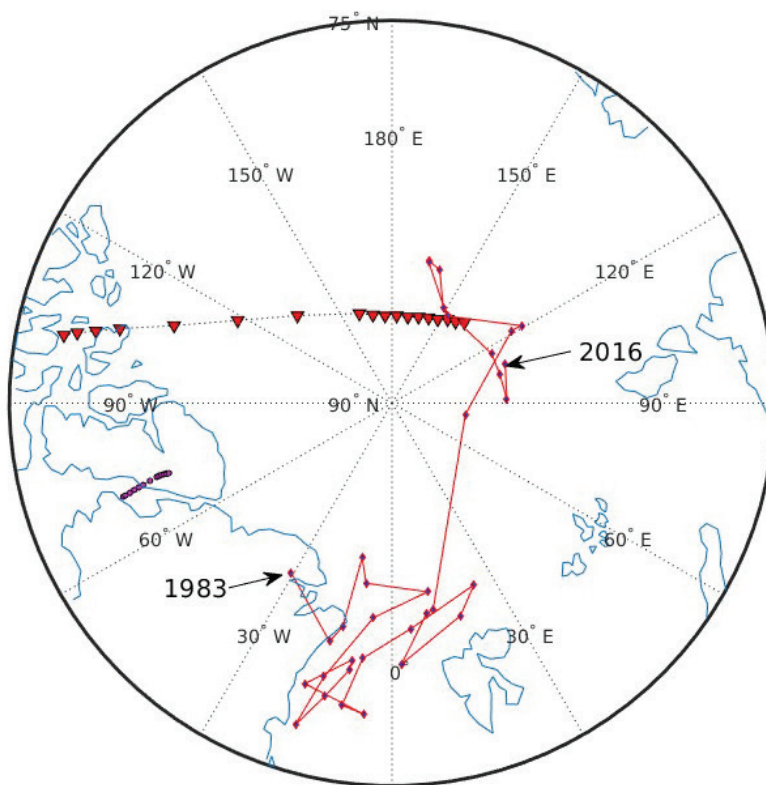


Рис. 7. Смещение гипоцентра экваториальной границы аврорального овала в 1983–2016 гг. Красные треугольники – положение магнитного полюса, точки – геомагнитный полюс, красная линия – траектория гипоцентра. Показаны точки начала траектории (1983 г.) и конца (2016 г.)

Выводы

Результаты статистической обработки данных ИСЗ серии DMSP за период с 1983 по 2016 гг. показали смещение экваториальной границы аврорального овала зоны полярных сияний вслед за движением магнитного полюса. Результаты для геомагнитно-спокойных дней для утреннего и вечернего MLT секторов в целом схожи, хотя более ярко выражены для вечернего MLT сектора. Количественные значения смещения экваториальной границы аврорального овала показывают, что используемый в численном моделировании прием механического перемещения аврорального овала вслед за магнитным полюсом приведет к переоценке возможных эффектов. В направлении смещения магнитного полюса смещение экваториальной границы овала сияний совпадает с движением полюса, но оказывается меньше, чем предполагалось. В противоположном секторе вместо смещения к югу также наблюдалось смещение экваториальной границы к северу.

Самым заметным оказывается смещение гипоцентра экваториальной границы аврорального овала. Вследствие чего мы считаем необходимым уточнение используемых в настоящее время в глобальных компьютерных кодах эмпирических моделей высыпаний и ионосферных электрических полей, что необходимо, в частности, для прогноза условий распространения радиоволн в Арктической зоне России.

Финансирование

Данная работа частично финансировалась в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема №125012200655-9).

Список литературы

- Зверева Т.И. Движение магнитных полюсов Земли в последнем десятилетии // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 2. С. 278–286. <https://www.elibrary.ru/owwzeh>
- Ляхов А.Н., Лосева Т.В., Черменин А.В., Гаврилов Б.Г. Численное моделирование изменений ионосферы земли, вызванных трендом геомагнитного поля // Гелиогеофизические исследования. 2016. Выпуск 15. С. 49–58. <https://www.elibrary.ru/ypentb>
- Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Фуллер-Ройелл Т. Возможные последствия смещения магнитных полюсов для структуры и динамики верхней атмосферы Земли // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409. № 5. С. 688–690. <https://www.elibrary.ru/hvdfwv>
- Cnossen I., Richmond A.D. How changes in the tilt angle of the geomagnetic dipole affect the coupled magnetosphere-ionosphere-thermosphere system // J. Geophys. Res. 2012. Vol. 117. P. A10317. <https://doi.org/10.1029/2012JA018056>
- Hardy D.A., Holeman E.G., Burke W.J., Gentile L.C., Bounar K.H. Probability distributions of electron precipitation at high magnetic latitudes // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. P. A06305. <https://doi.org/10.1029/2007JA012746>
- Lin C.S., Lei P.F., Burke W.J. A model of median auroral electron flux deduced from Hardy 2008 model probability density maps. Air Force Res. Lab. 2014. AFRL-RV-PS- TM-2014-0001. – 26 p.
- Lowrie W., Kent D.V. Geomagnetic reversal frequency since the Late Cretaceous // Earth and Planetary Science Letters. 1983. Vol. 62. P. 305–313. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90001-8)
- Mandea M., Dormy E. Asymmetric behavior of magnetic dip poles // Earth Planets Space. 2003. Vol. 15. P. 153–157. <https://doi.org/10.1186/BF03351742>
- Mandea M., Chambodut A. Geomagnetic Field Processes and Their Implications for Space Weather // Surveys in Geophysics. 2020. Vol. 41. P. 1611–1627. <https://doi.org/10.1007/s10712-020-09598-1>
- Shumaker T., Hardy D.A., Moran S., Huber A., McGarity J., Pantazis J. Precipitating ion and electron detectors (SSJ/4) for the Block 5D/Flight 8 DMSP satellite. Air Force Geophysics Lab. 1988. AFGL TR-88-0030. – 60 p.
- Vogt J., Zieger B., Stadelmann A., Glassmeier K.-H., Gombosi T.I., Hansen K.C., Ridley A.J. MHD simulations of quadrupolar paleomagnetospheres // J. Geophys. Res. 2004. Vol. 109. P. A12221. <https://doi.org/10.1029/2003JA010273>
- Zossi B., Fagre M., Amit H., Elias A.G. Polar caps during geomagnetic polarity reversals // Geophys. J. Int. 2019. Vol. 216. P.1334–1343. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy494>
- Zossi B., Amit H., Fagre M., Elias A.G. Observed Auroral Ovals Secular Variation Inferred from Auroral Boundary Data // Geosciences. 2021. Vol. 11. № 8. P. 351–365. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080351>

AURORAL OVAL DEFORMATION UNDER THE MAGNETIC POLES SHIFT

© 2025 A. N. Lyakhov*, Yu. I. Zetzer

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: alyakhov@idg.ras.ru*

The article presents the results of verification for the base hypothesis about the physical mechanism of magnetic pole shift impact on the ionosphere. In the previous works it was implicitly assumed that an auroral oval keeps its shape and intensity invariant in geomagnetic coordinates and shifts in geographic coordinates according to the magnetic pole shift. This hypothesis is verified by means of DMSP satellite data for 1983–2016. The statistical analysis has shown the shift of equator-ward boundary northward both in US and Siberian sectors. While the observed shifts for the magnetic and geomagnetic poles are 9° and 1.7° respectively for the same period of time, the shift of the equatorward boundary is less than 2° – 3° .

Keywords: magnetic pole, precipitation, auroral oval.