

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.015

## АСИММЕТРИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ДВУХ ПОЛУШАРИЯХ

А.А. Любчич, Т.А. Попова, Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов

*Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия*

**Аннотация.** Проведены расчеты магнитного поля Земли на высотах орбит спутников NOAA POES в северном и южном полушариях. Расчеты проводились в исправленных геомагнитных координатах AACGM (Altitude-Adjusted Corrected Geomagnetic Coordinates) с использованием модели внутреннего поля Земли IGRF (International Geomagnetic Reference Field) в пакете программ GEOPACK-2008, разработанных Н.А. Цыганенко. Показано, что по сравнению с Северным полушарием магнитное поле в Южном полушарии может быть ниже более чем на 10 000 нТл. Разница составляет ~40% на широте 50°, уменьшаясь до ~3% на широте 80°. Поле в Южном полушарии понижено на 30-90° восточной долготы AACGM, в долготном секторе Южно-Атлантической магнитной аномалии. Оценено влияние понижения магнитного поля на величину питч-угла заряженных частиц на высотах орбит спутников NOAA POES. Расчеты для разных лет (с 2014 по 2023 годы) показали, что хотя магнитное поле меняется со временем, но эти изменения не являются значительными – на широте 60° поле изменилось не более чем на 500 нТл в Северном полушарии и уменьшилось не более чем на 700 нТл в Южном полушарии. Оценено влияние внешнего магнитного поля, рассчитанного по модели Цыганенко T96, на положение сопряженных точек в двух полушариях.

### Введение

Внутреннее магнитное поле Земли неоднородно, имеет аномалии разных масштабов и знаков. Наиболее крупной положительной аномалией в Северном полушарии является Курская магнитная аномалия, впервые обнаруженная в 1773 году академиком П.Б. Иноходцевым во время работ по определению географического положения городов центральной части Европейской России. Аномалия связана с залежами железных руд. Крупная отрицательная магнитная аномалия в Южном полушарии, часто называемая Южно-Атлантической аномалией, была обнаружена по измерениям на первых искусственных спутниках Земли интенсивности радиации вместе с открытием радиационных поясов. *Вернов и др.* [1963] описывают эту аномалию по данным измерений 2го советского корабля-спутника, имевшего близкую к круговой орбиту высотой 320 км. Речь идет о прототипе корабля «Восток», на котором в 1960 году совершили полет и успешно вернулись на Землю собаки Стрелка и Белка. Причина этой аномалии до сих пор обсуждается. Предполагается, что она вызвана внутренними неоднородностями на границе между внешним жидким проводящим ядром и внутренней мантией, влияющими на скорость течения (например, *Terra-Nova et al.* [2019] и ссылки там). Процессы в этой области протекают не быстро, согласно *Engbers et al.* [2020], аномалия существует уже около 10 миллионов лет. Исследование поведения магнитного поля в области Южно-Атлантической аномалии палеомагнитными методами сталкивается с рядом очевидных трудностей. Однако ничего не мешает проведению таких исследований недалеко от аномалии, на территории Центральной и Южной Африки. Здесь удалось обнаружить периоды быстрого, в историческом смысле, изменения величины и направления геомагнитного поля в нашу эру (*Hare et al.* [2018]). Наиболее сильно геомагнитное поле менялось в период между 1225 и ~1550 годами. Некоторые исследователи полагают, что эта аномалия может быть предвестником предстоящей смены полярности магнитного поля Земли, когда физически северный магнитный полюс вернется домой, в северное полушарие (обсуждение этого вопроса можно найти, например, в статье *Pavón-Carrasco and De Santis* [2016]). Через сотню-другую тысяч лет посмотрим. А пока сформулируем цель исследования.

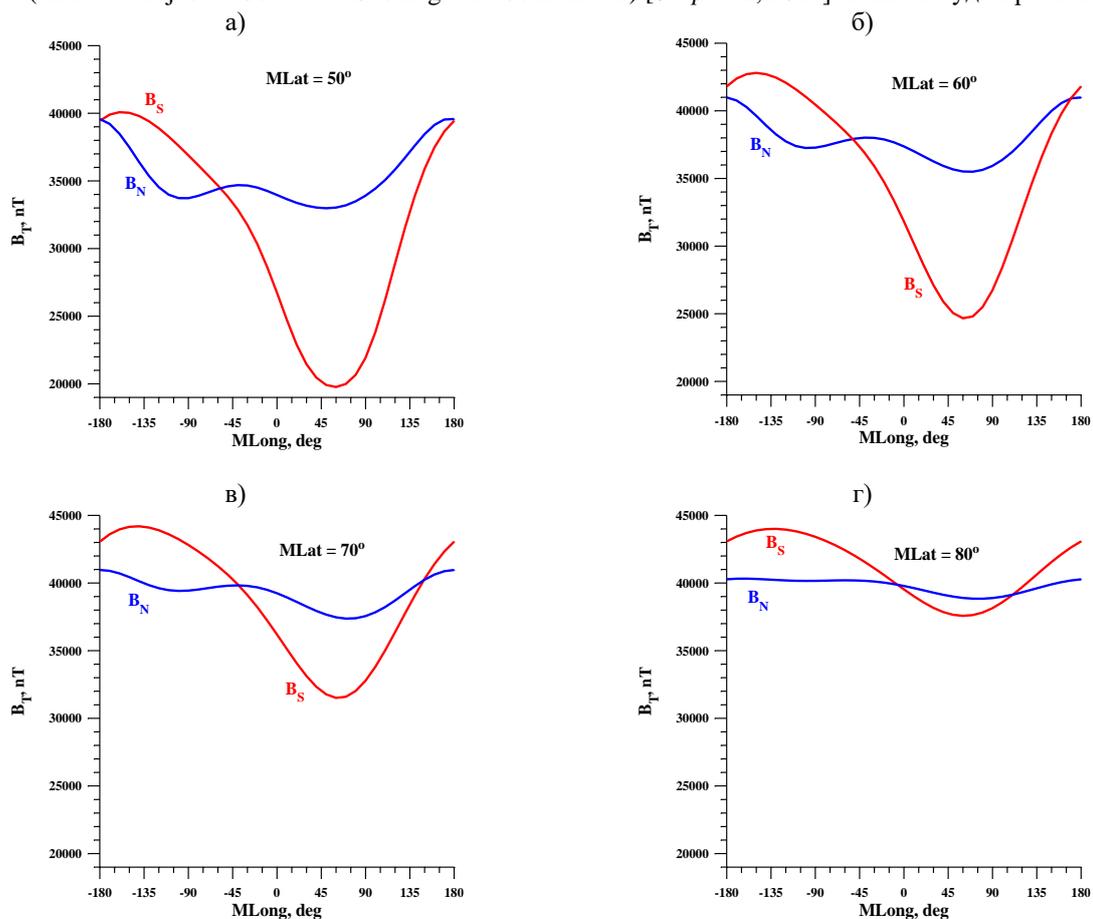
В работе исследуется поведение геомагнитного поля на высоте 850 км над Южно-Атлантической аномалией и оценивается ее возможное влияние на потоки заряженных частиц в сопряженных точках. Примерно на этой высоте пролетают спутники серии NOAA POES. Благодаря измерению потоков энергичных протонов и электронов на этих спутниках удалось заметно расширить наши знания о типах и механизмах высыпания релятивистских электронов и энергичных протонов (например, *Yahnin et al.* [2016], *Semenova et al.* [2019]).

### Основной раздел

Со студенческой скамьи известно, что движение заряженных частиц в магнитосфере Земли складывается из трех разномасштабных по времени процессов – быстрого вращения вокруг силовой линии магнитного поля, не интересующего нас здесь, колебания центра этого вращения, так называемого ведущего центра, вдоль силовой линии между зеркальными точками и медленного вращения (дрейфа) в долготном направлении

вокруг Земли, при котором электроны движутся в одну сторону, а протоны и примкнувшие к ним ионы – в противоположную. Магнитное поле уменьшается с удалением от Земли. Как правило, магнитное поле вдоль силовой линии достигает минимума в точке ее пересечения с экваториальной плоскостью или более-менее недалеко от нее. В возмущенных условиях возможны экзотические ситуации, когда вдоль силовой линии могут быть два и более минимума магнитного поля, и появляются дополнительные эффекты, связанные с ветвлением дрейфовых оболочек [Шабанский, 1972]. Колебание заряженной частицы вдоль силовой линии определяется минимальной величиной магнитного поля  $B_e$  и питч-углом частицы в этой точке  $\alpha_e$ . Частица при колебаниях отражается в зеркальных точках, где  $B_{\max} = B_e / \sin^2 \alpha_e$ . В недипольном магнитном поле частицы могут отражаться на разных высотах. Над Южно-Атлантической аномалией, где магнитное поле понижено, частицы в поисках своего максимума поля будут опускаться на меньшие высоты. Поэтому низкоорбитальные спутники в Южном полушарии могут фиксировать повышенные потоки частиц по сравнению с Северным полушарием (поскольку в Северном полушарии часть частиц будет отражаться выше траектории спутника, а в Южном – ниже). Отметим, что некоторые частицы могут достигнуть верхней границы атмосферы, так и не найдя свой максимум поля, и прекратят свои колебания вдоль силовой линии. Этот эффект может быть важен для самого медленного дрейфа частиц – долготного. При дрейфе поперек аномалии может происходить опустошение нижней части радиационного пояса [Blake et al., 2001]. Итак, общая картина процессов ясна, приступим к описанию деталей.

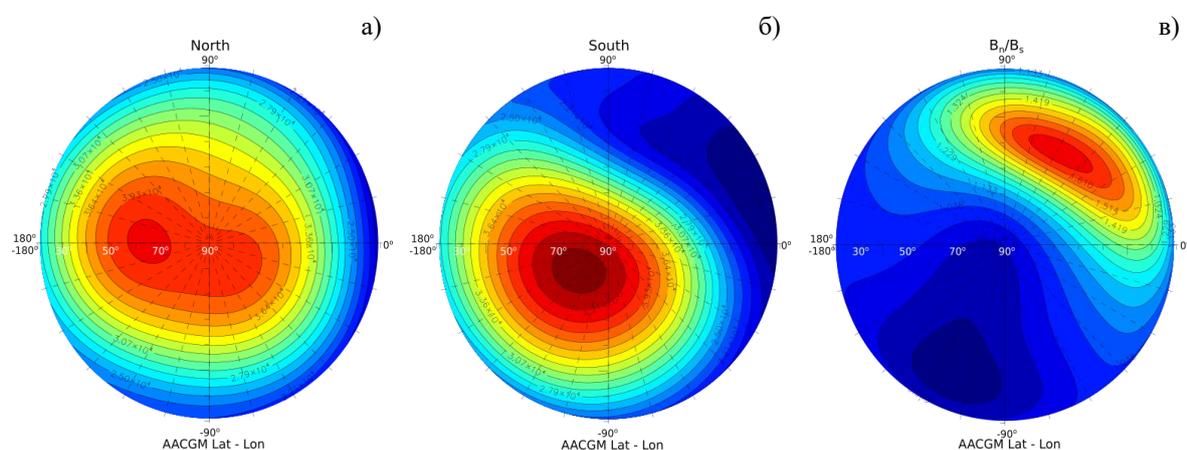
Рассчитывать внутреннее магнитное поле будем при помощи модели IGRF. Конкретно мы использовали модель IGRF-GSW-08, взятую с сайта <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack-2008.html>. Магнитное поле Земли со временем меняется, входными параметрами модели являются дата, время и координаты точки, выходными – величина компонент магнитного поля в этой точке в это время. Изменения магнитного поля со временем в модели учитываются через обновляемые коэффициенты разложения поля, точнее его потенциала, по сферическим гармоникам. Сравнить магнитное поле в разных полушариях разумно в какой-нибудь версии геомагнитных координат. Для спутников серии NOAA POES параметры орбиты даются в координатах AACGM (Altitude-Adjusted Corrected Geomagnetic Coordinates) [Shepherd, 2014]. В них и будем работать.



**Рисунок 1.** Рассчитанная величина магнитного поля на высоте 850 км в двух полушариях на широтах 50 (а), 60 (б), 70 (в) и 80 (г) градусов. Графики построены в AACGM координатах.

К сожалению, в используемом нами пакете Geopack-2008 эти координаты не используются. Поэтому приходится использовать не прямой путь. Задаем AACGM координаты точки, пересчитываем их, например, в географические координаты. Здесь можно воспользоваться «калькулятором» с сайта [https://sdnet.thayer.dartmouth.edu/aacgm/aacgm\\_calc.php#AACGM](https://sdnet.thayer.dartmouth.edu/aacgm/aacgm_calc.php#AACGM) или соответствующей процедурой из пакета SPEDAS (Space Physics Environment Data Analysis System). Используя географические координаты, проводим нужные нам вычисления. Затем, при необходимости, совершаем обратный переход.

Выберем, для примера, момент 11 UT 28 февраля 2014 года. Это событие рассматривалось в докладе [Яхнина и др., 2023], где отмечалось наличие слабых потоков захваченных релятивистских электронов в Южном полушарии при их отсутствии в Северном полушарии. На Рисунке 1 показаны расчеты величины магнитного поля на высоте 850 км в двух полушариях. Сильная разница в величине магнитного поля видна невооруженным глазом. С ростом широты (в рассматриваемом диапазоне) разница в величине магнитного поля уменьшается, но видно, что влияние Южно-Атлантической магнитной аномалии простирается до очень высоких широт. Впрочем, это одномерный взгляд на проблему. На Рисунке 2 представим двумерную картину. На рисунках широта меняется от 21° до 90°. Отметим, что 21° AACGM – это минимальная широта, которую может иметь точка на высоте 850 км, силовые линии с меньших широт проходят ниже орбиты спутника. Цветовая шкала на графиках для Северного и Южного полушарий меняется от ~44000 нТл (пунцовый цвет) до ~16000 нТл (темно-синий). Максимум магнитного поля наблюдается в Южном полушарии на широте около 75° и долготе около -135°, что согласуется с Рисунком 1. Минимум – на низких широтах (~23°) на долготе 15°. Отношение поля в Северном полушарии к полю в Южном полушарии меняется от ~1.65 (пунцовый цвет) до ~0.9 (темно-синий). Превышение максимально для широты около 45° и долготы около 60°.



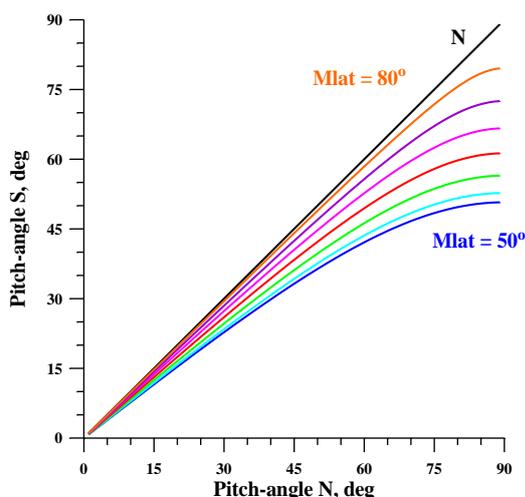
**Рисунок 2.** Величина магнитного поля в Северном (а) и Южном (б) полушариях, а также отношение величин поля в двух полушариях (в) в полярных AACGM координатах.

С течением времени внутреннее магнитное поле Земли меняется. Мы проверили, как оно изменилось за 10 лет, с 2014 по 2023 год. Оказалось, что за две пятилетки (напомним, что коэффициенты модели IGRF обновляются раз в 5 лет) на широте 60° магнитное поле изменилось незначительно, не более чем на 1.5%. Наибольшие изменения произошли в Северном полушарии – поле понизилось на долготах от -90° до 0°, в области между локальным минимумом и максимумом, видимыми на Рисунке 1б; изменения не превысили 500 нТл. В области Южно-Атлантической аномалии магнитное поле за 10 лет также уменьшилось, но незначительно, не более чем на 700 нТл.

Оценим влияние магнитной аномалии на питч-угол дрейфующих частиц. На Рисунке 3 приведена соответствующая картина. Видно, что, например, на широте 50° заряженные частицы с питч-углом 90° в северном полушарии в южном полушарии будут иметь питч-угол около 51°. Как следствие, частицы с большими питч-углами в Южном полушарии в Северном полушарии отразятся выше 850 км, и низкоорбитальные спутники NOAA/POES там их просто не увидят. Очевидно, что для большого класса питч-угловых распределений (например, сигарообразного, когда поток частиц по полю превышает поток поперек поля, или для распределения в форме бабочки, с максимумом на средних питч-углах) потоки частиц в Южном полушарии в области отрицательной магнитной аномалии могут превышать соответствующие потоки в противоположном полушарии.

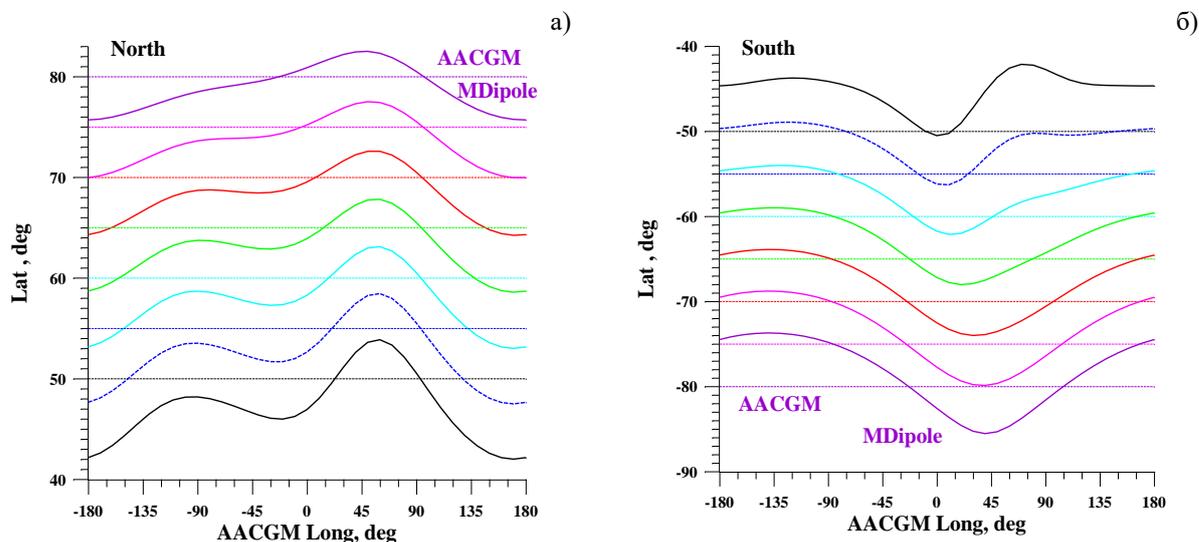
Остановимся еще на паре моментов. Иногда, при сравнении результатов измерений в разных полушариях, возникает соблазн воспользоваться максимально простыми координатными системами, например, дипольной системой координат. На Рисунке 4 показано сравнение координат точек в двух системах – AACGM и дипольной. Видно, что широта в дипольных координатах может более чем на 5° отличаться от широты в

AACGM, причем, в зависимости от долготы, разница может быть как положительной, так и отрицательной. Следовательно, использование простой дипольной системы координат может привести к неверным выводам.



**Рисунок 3.** Питч-угол заряженных частиц на высоте 850 км в Южном полушарии в зависимости от питч-угла на этой высоте в Северном полушарии. Черной линией показана биссектриса прямого угла, показывающая начальный питч-угол в Северном полушарии. Цветными линиями показаны зависимости для разных геомагнитных широт (от 50 до 80° с шагом в 5°).

И последнее. Мы рассматривали сопряженные точки по модели внутреннего магнитного поля IGRF. Однако внешнее магнитное поле тоже оказывает существенное влияние, особенно на высоких широтах. Попытаемся учесть это влияние с помощью модели Цыганенко T96. Пример расчетов дрейфовых траекторий в недипольном магнитном поле в этой модели дан в работе Любич и др. [2020]. Входными параметрами модели, помимо даты и координат, являются четыре величины:  $V_Y$  и  $V_Z$  компоненты межпланетного магнитного поля, динамическое давление солнечного ветра  $P_{dyn}$  и Dst-индекс. Возьмем соответствующие 11 UT 28 февраля 2014 года величины:  $V_Y = -7$  нТл,  $V_Z = +4$  нТл,  $P_{dyn} = 3$  нПа и  $Dst = -50$  нТл (на самом деле здесь была взята величина SYM/H индекса). Это условия на восстановительной фазе магнитной бури, весьма возмущенные условия, но попадающие в достоверный диапазон модели. Возьмем точки на разных широтах на долготе 60° AACGM и спроектируем их вдоль силовой линии из одного полушария в другое, в сопряженную точку. Результаты показаны в Таблице.



**Рисунок 4.** Дипольные (сплошные линии) и AACGM (пунктирные горизонтальные линии) координаты точек в двух полушариях – Северном (а) и Южном (б).

В левой части Таблицы показаны результаты проектирования с юга на север. В рассматриваемых условиях на данной долготе проектировать можно примерно до широты  $-71^\circ$  (далее силовая линия оказывается незамкнутой). Широта сопряженной точки оказывается близкой, долгота – тоже, но наблюдается небольшое смещение на запад, к меньшим долготам. С проектированием в обратную сторону чуть сложнее. Проектирование можно осуществлять до широты  $75^\circ$ , но до широты  $\sim 72^\circ$  координаты сопряженной точки оказываются близкими как по широте, так и по долготе (долготы оказываются чуть большими, точки смещаются на восток). Для больших широт вплоть до  $75^\circ$  силовая линия уходит из утреннего сектора в ночной сектор. Вершина силовой линии для широты  $75^\circ$  находится на  $X \sim -33$  Re,  $Y \sim -21$  Re. Для еще больших широт силовая линия, видимо, выходит на фланг магнитопаузы и перестает быть замкнутой.

**Таблица.** Результаты проектирования вдоль силовой линии между сопряженными точками из Южного полушария в Северное (слева) и наоборот (справа). Точки расположены на высоте 850 км. Используются координаты AACGM.

South		North		North		South	
Lat	Long	Lat	Long	Lat	Long	Lat	Long
-50	60	49.93	59.84	50	60	-50.03	60.16
-55	60	54.90	59.68	55	60	-55.10	60.33
-60	60	59.88	59.17	60	60	-60.15	60.87
-65	60	64.96	57.45	65	60	-65.08	62.66
-70	60	70.53	56.50	70	60	-69.67	64.42
-71	60	71.91	58.24	71	60	-70.46	64.09
				72	60	-71.12	62.34
				73	60	-71.58	52.55
				74	60	-75.59	21.82
				75	60	-79.30	-5.67

## Результаты

- Проведено сравнение величин магнитного поля в Северном и Южном полушариях в сопряженных точках на высоте 850 км на силовых линиях магнитного поля, выходящих из области Южно-Атлантической магнитной аномалии. Для 11 UT 28 февраля 2014 года такое исследование, видимо, проведено впервые.
- Оценено влияние пониженного магнитного поля на разницу питч-углов заряженных частиц в двух полушариях. Различие в питч-углах, в свою очередь, может приводить к разнице в величине потоков заряженных частиц, регистрируемой в сопряженных точках.
- Оценено влияние внешнего магнитного поля, рассчитанного по модели Цыганенко Т96, на положение сопряженных точек в двух полушариях. Расчеты проведены для фазы восстановления после магнитной бури, при Dst-индексе -50 нТл.

## Литература

- Вернов С.Н., Савенко И.А., Шаврин П.И., Тверская Л.В. О структуре радиационных поясов Земли на высоте 320 км // Геомагнетизм и Аэрномия, 1963, Т. 3, № 5, С. 812–815.
- Любчик А.А., Демехов А.Г., Яхнин А.Г. Характеристики питч-угловой анизотропии энергичных протонов в дневном секторе магнитосферы, обусловленной дрейфом частиц в недипольном магнитном поле // Геомагнетизм и Аэрномия, 2020, Т. 60, № 4, С. 478–489.
- [Lyubchich A.A., Demekhov A.G., Yahnin A.G. Characteristics of the pitch-angle anisotropy of energetic protons in the daytime magnetosphere due to particle drift in the nondipole magnetic field // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020, V. 60, Is. 4, P. 461–471. DOI: 10.1134/S001679322004009X]
- Шабанский В.П. Явления в околоземном пространстве. М.: Наука. 272 с. 1972.
- Яхнина Т.А., Демехов А.Г., Любчик А.А., Федоренко Ю.В. Наблюдение высокочастотных пульсаций PC1 и связанных с ними потоков энергичных протонов на малых высотах в условиях различных геомагнитных возмущений // 18-ая конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 06-10 февраля 2023, ИКИ РАН, Москва, Сборник тезисов докладов, стр. 427, 2023. ([https://plasma2023.cosmos.ru/docs/2023/plasma2023\\_abstracts.pdf](https://plasma2023.cosmos.ru/docs/2023/plasma2023_abstracts.pdf))
- Blake J.B., Inan U.S., Walt M., Bell T.F., Bortnik J., Chenette D.L., Christian H.J. Lightning-induced energetic electron flux enhancements in the drift loss cone // *J. Geophys. Res.*, V. 106, No. A12, P. 29733–29744, 2001. <https://doi.org/10.1029/2001JA000067>
- Engbers Y.A., Biggin A.J., Bono R.K. Elevated paleomagnetic dispersion at Saint Helena suggests long-lived anomalous behavior in the South Atlantic // *The Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, V. 117, No. 31, P. 18258–18263, 2020. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001217117>
- Hare V.J., Tarduno J.A., Huffman T., Watkeys M., Thebe P.C., Manyanga M., Bono R.K., Cottrell R.D. New archeomagnetic directional records from Iron Age Southern Africa (ca. 425–1550 CE) and implications for the South Atlantic Anomaly // *Geophysical Research Letters*, V. 45, P. 1361–1369, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017GL076007>
- Pavón-Carrasco F.J., De Santis A. The South Atlantic Anomaly: The Key for a Possible Geomagnetic Reversal // *Frontiers in Earth Science*, V. 4:40, 2016. DOI: 10.3389/feart.2016.00040
- Shepherd S.G. Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 119, Is. 9, P. 7501–7521, 2014. <https://doi.org/10.1002/2014JA020264>
- Semenova N.V., Yahnin A.G., Yahnina T.A., Demekhov A.G. Properties of localized precipitation of energetic protons equatorward of the isotropic boundary // *Geophysical Research Letters*, V. 46, Is. 20, P. 10932–10940, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GL085373>
- Terra-Nova F., Amit H., Choblet G. Preferred locations of weak surface field in numerical dynamos with heterogeneous core–mantle boundary heat flux: consequences for the South Atlantic Anomaly // *Geophysical Journal International*, V. 217, Is. 2, P. 1179–1199, 2019. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy519>
- Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Gvozdevsky B.B., Pashin A.B. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 121, Is. 9, P. 8286–8299, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JA022765>