

УДК 523.4-854

ГЕОСТАЦИОНАРНЫЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ МАГНИТОПАУЗЫ В ФЕВРАЛЕ – АПРЕЛЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. А. В. Дмитриев*

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*dalex@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 09.09.2023 г.

Принята к публикации 11.09.2023 г.

Проанализированы геостационарные пересечения магнитопаузы, когда геостационарные спутники оказывались в магнитослое, во время магнитных бурь 26 февраля, 23 марта и 23 апреля 2023 г. Интервалы магнитослоя идентифицированы по магнитным данным *GOES-16* и *GOES-17*. Проведен сравнительный анализ различных моделей магнитопаузы на основе данных о межпланетной среде, полученных с космических аппаратов *THEMIS-E* и монитора *Wind*. Сравнительный анализ моделей на основе статистических параметров по определению интервалов магнитослоя показал, что для всех трех событий высокую точность демонстрирует модель, представленная в работе [1]. Для событий с низкой буревой активностью на фоне небольших отрицательных значений B_z -компоненты межпланетного магнитного поля хорошие результаты дает модель, описанная в работе [2]. Для экстремальных событий с очень высокими давлениями и/или очень сильными отрицательными межпланетного магнитного поля B_z хорошую точность показывает модель, показанная в статье [3], а также удовлетворительную точность демонстрируют модели, представленные в работах [4] и [5]. Кроме того, показано, что на точность моделей влияют следующие факторы и эффекты: выбор межпланетного монитора, зависимость модели от давления солнечного ветра, эффект насыщения воздействия B_z , асимметрия магнитопаузы утро – вечер и эффект предыстории.

DOI: 10.31857/S0023420624020083, EDN: kyrkaz

ВВЕДЕНИЕ

Проблема предсказания пересечений магнитопаузой геостационарной орбиты актуальна [6]. Геостационарные пересечения магнитопаузы (ГПМ) вызываются приближением магнитослоя к Земле на геоцентрические расстояния менее 6.6 земного радиуса (R_E), в результате чего геостационарные спутники оказываются в магнитослое и даже в межпланетной среде [7]. Практически это означает выход космического аппарата (КА) за пределы магнитосферы, что сопряжено с потерей ориентации по магнитному полю и воздействию на КА потоков плотной плазмы, а также энергичных частиц солнечного и гелиосферного происхождения, что может привести к повреждению или даже потере геостационарных КА [8–11]. Более того, понимание динамики магнитопаузы при сильно возмущенных межпланетных и геомагнитных условиях, когда наблюдаются ГПМ, позволяет глубже

понять природу взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой.

Создан целый ряд моделей, позволяющих предсказывать ГПМ по условиям в межпланетной среде [2–5, 12, 13]. Эти модели учитывают различные нелинейные эффекты, которые не проявляются в динамике магнитопаузы при невозмущенных условиях. Одним из таких эффектов является так называемое насыщение воздействия отрицательной B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), а именно существует порог насыщения воздействия ММП B_z на магнитопаузу, ниже которого магнитопауза больше не реагирует на дальнейшее усиление большого отрицательного B_z [4, 12, 14, 15].

Другим эффектом является асимметрия магнитопаузы утро – вечер [14, 16]. Он состоит в том, что при больших отрицательных ММП B_z магнитопауза сдвигается на вечер, так что для одних и тех же условий ГПМ чаще наблюдаются

в предполуденном секторе. Эффект асимметрии учтен только в некоторых моделях [1–3, 5].

Еще одним эффектом является предыстория [17], т.е. зависимость реакции магнитопаузы не только от текущих, но и предыдущих условий в межпланетной среде. Эффект предыстории был предложен для объяснения ложных предсказаний магнитослоя на начальной фазе магнитных бурь, когда все модели уверенно предсказывали ГПМ, но геостационарные спутники их не видели. Этот эффект учтен в модели [3].

Проводилось несколько исследований по сравнительному анализу различных моделей ГПМ для целого ряда магнитных бурь [17–20]. Эти исследования показали большой разброс в отклонениях предсказания моделей от наблюдений во время различных бурь. В результате было довольно проблематично определить модель, которая бы обладала наилучшей точностью для ГПМ. В настоящей работе представлены результаты сравнительного анализа ряда моделей магнитопаузы по предсказанию ГПМ во время магнитных бурь 26 февраля, 23 марта и 23 апреля 2023 г.

МЕТОДЫ

Экспериментальные данные

Спутниковые экспериментальные данные о ключевых параметрах космической плазмы и магнитного поля получены из базы данных CDAWeb (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>). В работе анализируются события, когда геостационарный спутник наблюдал магнитослой. При этом ГПМ определяется как момент выхода КА из магнитосферы в магнитослой, так и момент возвращения КА из магнитослоя в магнитосферу. Для этого используются магнитные данные геостационарных КА *GOES-16* и *GOES-17* с временным разрешением 0.1 с. Аппараты *GOES-16* и *GOES-17* находились на географических долготах 285° и 255°, таким образом они пересекали локальный полдень соответственно в 17.00 и 19.00 UT. Магнитослой идентифицировался как сильные отклонения магнитного поля, измеряемого на КА *GOES*, от квазистационарного геомагнитного поля. Отклонение считается сильным, если компонента B_z становится отрицательной или напряженность поля B_t становится меньше 100 нТл. При этом B_z на КА *GOES* необязательно должна быть отрицательной, если ММП B_z положительная. В последнем случае выход в магнитослой вызван экстремально сильным давлением солнечного ветра.

Данные о солнечном ветре и ММП были получены с межпланетного монитора *Wind* и КА *THEMIS-E*. Монитор *Wind* находится на расстоянии более 200 R_E от Земли в сторону Солнца. Данные с КА *THEMIS-E* использовались, когда он выходил в межпланетную среду перед головной ударной волной. На КА *Wind* магнитные данные с инструмента MFI и плазменные данные с инструмента SWE имеют разрешение ~100 с. На КА *THEMIS* данные с инструмента FGM и плазменные данные с инструмента ESA в Reduced Mode имеют разрешение ~3 с. Данные КА *ACE* не использовались вследствие сильной деградации его плазменного инструмента.

Для анализа также использовались данные по индексу SYM-H с разрешением 1 мин, полученные из Мирового центра данных в Киото (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>). Индекс SYM-H, как и часовой *Dst*, является мерой интенсивности кольцевого тока, точнее его симметричной части, которая вычисляется с более высоким временным разрешением.

Привязка межпланетных условий к состоянию магнитосферы, т.е. временная задержка для измерений в межпланетной среде определялась в первом приближении по времени прямого распространения солнечного ветра. Однако время задержки может меняться при изменении ориентации межпланетных структур. Уточняющая привязка осуществлялась по двум критериям [21]: основному, по кросс-корреляции давления солнечного ветра с SYM-H, и дополнительному, по корреляции B_z - и B_y -компонент ММП с измерениями в магнитослое на КА *GOES*.

Вследствие сильного разброса временных разрешений, временные ряды различных параметров были приведены к общему разрешению в 1 с. С этой точностью определялись пересечения магнитопаузы. Для низких разрешений проводилась экстраполяция текущего значения до следующего момента измерения. Все векторные величины были представлены в полностью аберрированной системе координат aGSM [22], учитывающей скорость вращения Земли вокруг Солнца и нерадиальность солнечного ветра, которая часто сопровождает ГПМ [21].

Модели магнитопаузы

В работе рассматривается шесть моделей, которые ранее успешно использовались для определения ГПМ [20]: асимметричная модель KS [1], модель Sh [4], нейросетевая модель DS [5], асимметричная модель Ch [13], трехмерная модель Li [2] и предсказательная модель PM

[3]. Модели характеризуются различными зависимостями от разных параметров.

В частности, модели KS, Sh и Ch рассчитывают геоцентрическое расстояние до магнитопаузы R_m как функцию конического угла Ca от оси X , направленной от Земли к Солнцу, а также динамического давления солнечного ветра P_d и компоненты ММП B_z в системе координат GSM:

$$R_m = F(Ca, P_d, B_z).$$

В модели Ch учитывается эффект абберации магнитосферы из-за вращения Земли вокруг Солнца. В модели KS учтен эффект асимметрии магнитосферы при отрицательной ММП B_z , что приводит к сдвигу магнитопаузы на вечер. Нейросетевая модель DS представляет квазитрехмерную форму магнитопаузы как функцию GSM-широты $GSMLat$ и долготы $GSMLon$, P_d и компонент ММП B_y и B_z в GSM:

$$R_m = F(GSMLat, GSMLon, P_d, B_z, B_y).$$

Трехмерная модель Li представляет магнитопаузу как функцию $GSMLat$, $GSMLon$, P_d , B_z , напряженности ММП B и угла наклона земного диполя ψ :

$$R_m = F(GSMLat, GSMLon, P_d, B_z, B, \psi).$$

Предсказательная модель PM позволяет вычислять полное давление, необходимое для ГПМ в данной точке ($GSMLat$, $GSMLon$), как функцию ММП B_z и Dst вариации:

$$P_{mp} = F(GSMLat, GSMLon, B_z, Dst).$$

Полное давление солнечного ветра P_{sw} вычисляется как:

$$P_{sw} = P_d + P_t + P_m,$$

где динамическое давление P_d учитывает вклад гелия, P_t — тепловое давление плазмы солнечного ветра, P_m — магнитное давление ММП. В случае если $P_{mp} < P_{sw}$, геостационарный КА должен пересечь магнитопаузу и выйти в магнитослой.

Статистический анализ

Точность моделей определяется по статистическим параметрам, которые были предложены ранее в работах [19, 22], а именно по данным наблюдений и показаниям моделей для каждого отдельно взятого события вычисляется статистика (время в секундах) HT , MT , FA , CR , как показано в табл. 1. Например, время HT (Hit) аккумулирует интервалы, когда геостационарный спутник находится в магнитослое, при этом модельное расстояние до магнитопаузы R_m меньше, чем расстояние до спутника R_g . Время MT (Miss) соответствует неспособности модели показать выход спутника в магнитослой. Время FA (False

Таблица 1. Статистическая таблица

	Магнитослой	Магнитосфера
$R_m < R_g$	HT	FA
$R_m \geq R_g$	MT	CR

Alarm) соответствует ошибочному предсказанию моделью магнитослоя. Время CR (Correct Rejection) соответствует правильному предсказанию модели положения спутника внутри магнитосферы. Очевидно, что сумма всех статистик равна полной длительности анализируемого интервала в секундах:

$$N = HT + MT + FA + CR.$$

Для сравнения моделей на основе статистик HT , MT , FA , CR рассчитываются следующие статистические параметры:

$$PCP = \frac{HT + CR}{N}.$$

Параметр PCP (Probability of Correct Prediction) показывает, насколько хорошо модель способна правильно предсказать интервалы, когда КА находился в магнитослое и магнитосфере: $PCP = 0$ — полная неспособность, $PCP = 1$ — идеальное предсказание всех интервалов.

$$POD = \frac{HT}{HT + MT}$$

Параметр POD (Probability of Detection) показывает, насколько хорошо модель способна предсказать интервалы магнитослоя: $POD = 0$ — полная неспособность, $POD = 1$ — идеальное предсказание всех интервалов магнитослоя.

$$FAR = \frac{FA}{HT + FA}$$

Параметр FAR (False Alarm Rate) показывает, как часто модель ошибается при предсказании интервалов магнитослоя: $FAR = 0$ — нет ложных предсказаний магнитослоя, $FAR = 1$ — все предсказания интервалов магнитослоя являются ложными.

$$OUR = \frac{MT - FA}{MT + FA}$$

Параметр OUR (Overestimation Underestimation Ratio) показывает насколько сбалансирована модель. Если модель систематически завышает, т.е. переоценивает, расстояние до магнитопаузы, то OUR приближается к 1. Очевидно, для такой модели FAR будет относительно мал, но и POD будет тоже невелик. Для модели, систематически занижающей расстояние до магнитопаузы, OUR

приближается к -1 . Такая модель будет иметь высокий *FAR*, но и большой *POD*. Для сбалансированной модели *OUR* близко к 0.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В первой половине 2023 г. ГПМ наблюдались на геостационарной орбите КА *GOES-16* и *GOES-17* в трех событиях во время главной фазы магнитных бурь 26 февраля, 23 марта и 23 апреля. Главная фаза этих бурь пришлась на вторую половину дня, что создало условия для наблюдения ГПМ на КА *GOES-16* и *GOES-17*.

Событие 26.II.2023

Магнитная буря 26.II.2023 была умеренной ($\min Dst = -69$ нТл). Она началась с SSC в 19:23 UT и достигла максимума к 22:30 UT. ГПМ наблюдались КА *GOES-17* в интервале с 20:44 до 21:10 UT, суммарное время в магнитослое составило 488 с. На рис. 1 показаны моменты пересечений, межпланетные и геомагнитные условия, а также показания моделей для данного интервала. В это время КА *GOES-17* находился в послеполюденном секторе в районе

14:00 LT. *GOES-16* находился довольно далеко от полудня, в районе 16:00 LT, поэтому он не наблюдал ГПМ.

Межпланетные условия измерялись КА *Wind*, для которого время задержки составляло около 49 мин. На рис. 1 приведена обобщающая картина. В реальности время задержки изменялось в зависимости от скорости солнечного ветра и ориентации межпланетных структур, поэтому весь интервал был разбит на сектора длительностью 10 мин, и для каждого сектора определялось время задержки.

На рис. 1 видны сильные вариации компонент ММП B_z и B_y , которые сопровождалась высоким давлением солнечного ветра $P_{sw} > 12$ нПа. По классификации, приведенной в работе [23], такая геоэффективная структура характерна для уплотненного межпланетного слоя типа Sheath, формирующегося за межпланетной ударной волной перед телом быстрого магнитного облака, связанного с выбросом корональных масс от Солнца. Таким образом, в данном случае причиной ГПМ было высокое P_{sw} на фоне очень сильной варьирующей ММП B_z в области межпланетной структуры типа Sheath.

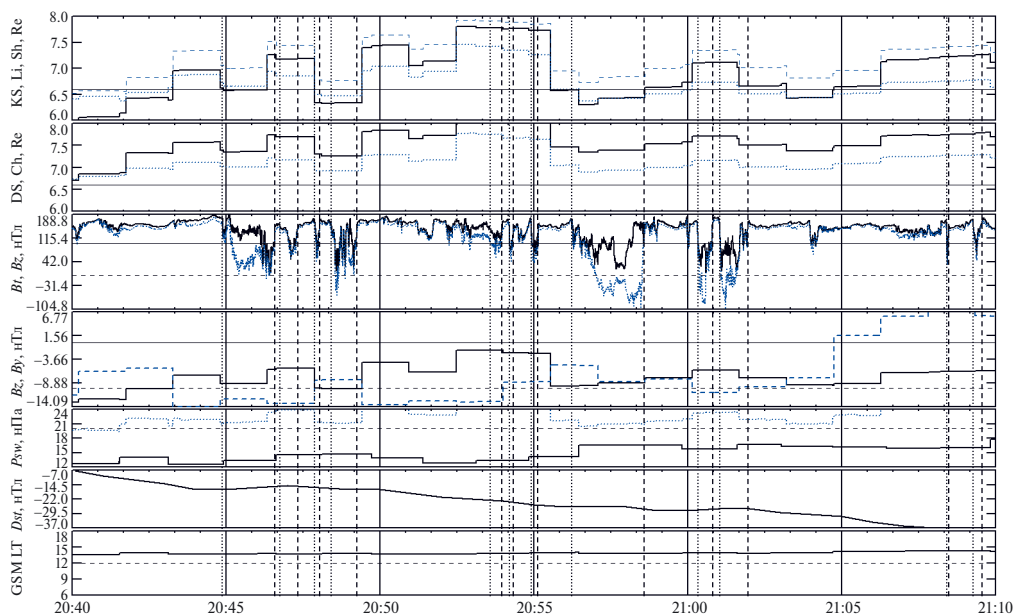


Рис. 1. Пересечения геостационарной орбиты магнитопаузой 26.II.2023 по данным геостационарного *GOES-17* и для межпланетных условий по данным КА *Wind* (панели сверху вниз): расстояние до магнитопаузы по моделям KS (сплошная кривая), Li (синяя штриховая кривая), Sh (синяя пунктирная кривая); расстояние до магнитопаузы по моделям DS (сплошная кривая), Ch (синяя штриховая кривая); данные КА *GOES-17* по полному магнитному полю (сплошная кривая) и GSM B_z -компоненте; компоненты ММП GSM B_z (сплошная кривая) и B_y (синяя пунктирная кривая); полное давление солнечного ветра P_{sw} (сплошная черная кривая) и давление, необходимое для ГПМ по модели РМ (синяя штриховая кривая); Dst -вариация геомагнитного поля; местное время *GOES-17* в аберированных GSM-координатах. Вертикальные штриховые и пунктирные линии обозначают ГМП, соответственно выход в магнитослой и возврат в магнитосферу. Временной сдвиг для данных КА *Wind* составляет 49 мин.

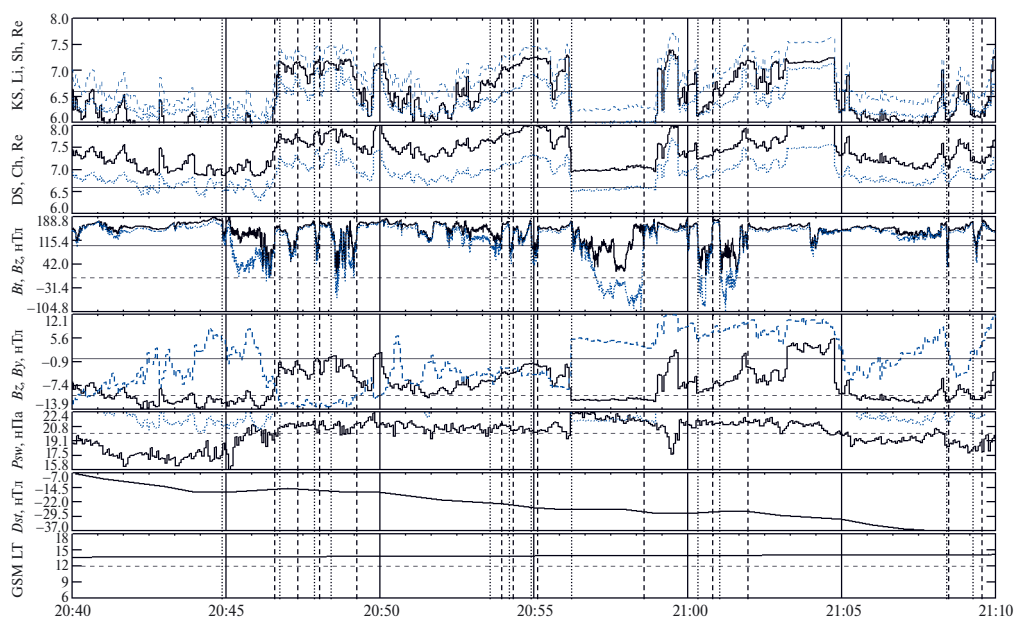
Таблица 2. Статистические характеристики моделей для 26.II.2023

Модель	<i>OUR</i>	<i>FAR</i>	<i>PCP</i>	<i>POD</i>
KS-Wi	0.114	0.726	0.585	0.507
KS-TH	-0.856	0.646	0.567	0.957
Sh-Wi	0.925	1.000	0.744	0.000
Sh-TH	-0.136	0.608	0.661	0.726
Ch-Wi	1.000	0.000	0.774	0.000
Ch-TH	0.778	0.404	0.786	0.365
DS-Wi	1.000	0.000	0.774	0.000
DS-TH	1.000	0.000	0.774	0.000
Li-Wi	-0.238	0.706	0.553	0.699
Li-TH	-0.991	0.695	0.449	0.997
PM-Wi	1.000	0.000	0.774	0.000
PM-TH	0.995	1.000	0.756	0.000

Как видно на рис. 1, интервалы магнитослоя характеризуются сильными отклонениями магнитного поля, измеряемого на КА *GOES*, от квазистационарного геомагнитного поля. В интервале 20:45–20:55 UT значения B_z на КА *GOES* были преимущественно положительными, в то время как ММП B_z был отрицательным. Это может быть связано с тем, что КА *Wind* наблюдал другую структуру солнечного ветра, которая не достигла Земли. В целом магнитослой наблюдался, когда давление солнечного ветра P_{sw} было высоким и варьировало от 13:5 до 17 нПа, ММП B_z варьировала от -10 до -2 нТл и SYM-H индекс от -14 до -37 нТл.

На двух верхних панелях рис. 1 показаны расстояния до магнитопаузы, вычисленные

по различным моделям. Хорошо видно, что модели Sh, Ch и DS систематически переоценивают расстояние до магнитопаузы и поэтому не могут предсказать ГПМ. Аналогичная ситуация с моделью PM, которая систематически завышает давление солнечного ветра, необходимое для ГПМ. Точность различных моделей представлена статистическими параметрами в табл. 2 в первых строчках. Для моделей с систематической переоценкой статистические параметры $OUR = 1$, $FAR = 0$ и $POD = 0$, т.е. в данном случае эти модели вырождаются. Среди остальных наибольшую точность демонстрируют модели KS и Li. Здесь следует отметить интервал 20:40–20:43 UT, когда эти модели недооценивают расстояние

Рис. 2. То же, что на рис. 1, но межпланетные параметры измерялись на КА *THEMIS-E* с временным сдвигом 1 мин.

до магнитопаузы и показывают ложный интервал магнитослоя. Это может быть связано как с несовершенством моделей, так и другой структурой солнечного ветра, наблюдаемой на *KA Wind*.

Данное предположение можно проверить, используя данные *KA THEMIS-E*, полученные непосредственно перед головной ударной волной, как показано на рис. 2. В этой области наблюдаются несколько иные условия, так что магнитослой наблюдался при давлениях P_{sw} от 15.8 до 22.4 нПа, и ММП B_z варьировала от -13.9 до $+3$ нТл. Более высокое давление и сильное отрицательное ММП B_z в интервале 20:40–20:45 UT вызвало ложные интервалы магнитослоя по моделям KS, Sh, Ch и Li. Таким образом, в данном случае имеет место несовершенство моделей, заключающееся в занижении расстояния до магнитопаузы при сильных отрицательных B_z на ранней стадии развития магнитной бури, когда кольцевой ток еще не развит и Dst вариация мала. Этот эффект учтен в модели PM, которая не показала ложного магнитослоя. Аналогичная ситуация наблюдается в интервалах 20:50–20:55 UT и 21:05–21:03 UT, когда модели KS, Sh, и Li также показывают ложный магнитослой, а модель PM нет. С другой стороны, практически все модели, за исключением DS, хорошо отработали интервал магнитослоя от 20:56 до 20:59 UT, когда давление P_{sw} превысило 22 нПа и B_z упала ниже -10 нТл.

Статистические параметры для различных моделей представлены в табл. 2 во вторых строчках. В данном случае наилучшую точность демонстрирует модель Sh с хорошим балансом (OUR близок к 0) и высоким PCP , хотя ее POD не так невелик, как у моделей KS и Li. Однако эти модели в данном случае сильно недооценивают расстояние до магнитопаузы, что проявляется в большом отрицательном OUR и относительно высоком FAR . Самое высокое $PCP = 0.786$ и низкий $FAR = 0.404$ демонстрирует модель Ch, однако у нее довольно высокий процент переоценки расстояния до магнитопаузы ($OUR = 0.778$), что приводит к слабому предсказанию интервалов магнитослоя с наименьшим $POD = 0.365$. Учитывая все статистические характеристики, можно заключить, что для данного события наилучшими являются модели KS, Sh и Li.

Событие 23.III.2023

Магнитная буря 23.III.2023 была начальной интенсификацией ($\min Dst = -70$ нТл) сильной бури, которая началась с SSC в 06:00 UT и достигла максимума к 14:41 UT. В этот день данные с *KA GOES-17* отсутствуют. ГПМ наблюдались *KA GOES-16* в предполуденном секторе в районе 09:00 LT в коротком интервале с 14:12 до 14:30 UT, с суммарным временем магнитослоя 421 с, как показано на рис. 3. В этот период *KA THEMIS* находился магнитослой.

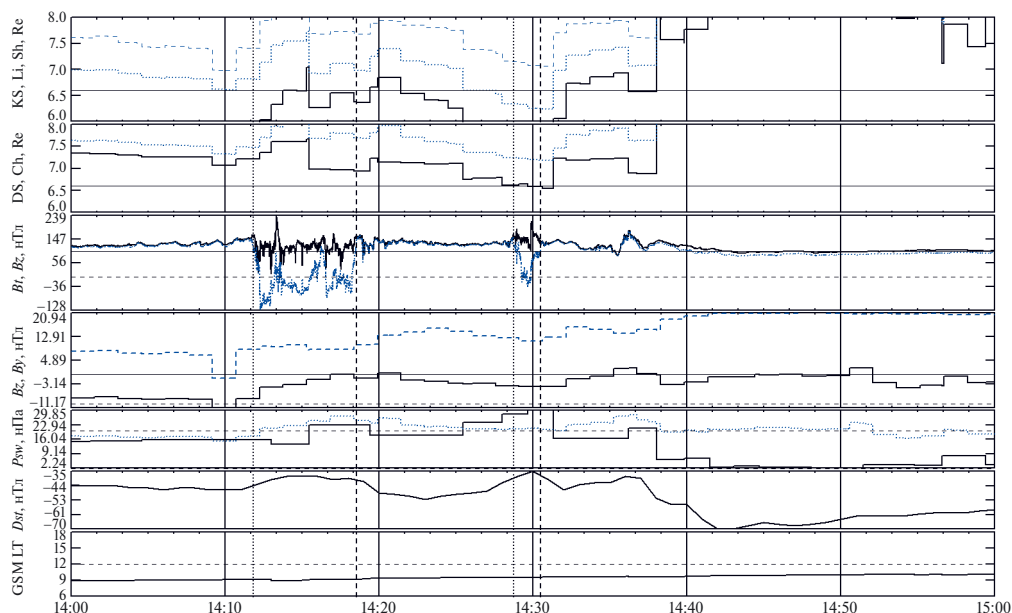


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для 23.III.2023. Временной сдвиг 51 мин.

Таблица 3. Статистические характеристики моделей для 23.III.2023

Модель	<i>OUR</i>	<i>FAR</i>	<i>PCP</i>	<i>POD</i>
KS-Wi	−0.946	0.595	0.436	0.980
Sh-Wi	1.000	0.000	0.571	0.000
Ch-Wi	1.000	0.000	0.571	0.000
DS-Wi	0.839	0.663	0.548	0.080
Li-Wi	0.428	0.702	0.472	0.249
PM-Wi	0.428	0.702	0.472	0.249

Межпланетные условия измерялись КА *Wind*. Время задержки для них составило 49 мин. Как видно на рис. 3, интервалы магнитослоя характеризуются большой отрицательной *Bz*. В целом магнитослой наблюдался, когда давление солнечного ветра *Psw* было очень высоким от 16.5 до 30 нПа, ММП *Bz* варьировала от −8 до 0 нТл, и *Dst* было в районе от −35 до −44 нТл. Интервалы магнитослоя прекратились после 14:32 UT, когда давление солнечного ветра *Psw* упало за 10 мин практически в 15 раз с 30 до 2 нПа. Сильное падение *Psw* на фоне слабого *Bz* проявляется в большой отрицательной бухте в SYM-H индексе с −35 нТл в 14:30 UT до −70 нТл в 14:41 UT, т.е. это не была интенсификация кольцевого тока [7]. Хорошая корреляция *Psw* и SYM-H доказывает правильность выбранного времени задержки. Как и в предыдущем событии, характерная динамика компонент ММП и давления солнечного ветра указывает, что ГПМ связаны с условиями в межпланетной структуре типа Sheath.

На рис. 3 видно, что первый интервал магнитослоя в 14:11:19–14:18:33 UT был предсказан только моделью KS. Второй короткий интервал при очень высоком *Psw* = 30 нПа в 14:28:45–14:30:29 был предсказан моделями KS, Li, DS, PM. Модели Sh, Ch систематически переоценивали расстояние до магнитопаузы и не показали ГПМ. По статистическим параметрам, приведенным в табл. 3, можно заключить, что в данном событии все модели разбалансированы (большой *OUR*). Наилучшую точность для выхода в магнитослой дала модель KS с *POD* = 0.98 и самым низким *FAR*. Разумную точность также продемонстрировали модели Li и PM с относительно высокими *PCP* и *POD*. Таким образом, в данном случае наилучшую точность имеют модели KS, Li, и PM.

Событие 23.IV.2023

Магнитная буря 23.IV.2023 была сильной ($\min Dst = -165$ нТл). Она началась в 09:00 UT и достигла максимума к 22:00 UT. В этот день данные с КА *GOES-17* отсутствуют. ГПМ

наблюдались КА *GOES-16* в полуденном секторе в районе 12:00–13:00 LT в интервале 18:11–19:37 UT. Суммарное время в магнитослое составило 3586 с. Интервалы магнитослоя, межпланетные и геомагнитные условия, а также показания моделей показаны на рис. 4. Межпланетные условия измерялись КА *Wind*. Среднее время задержки составило 37 мин. В реальности оно изменялось в зависимости от скорости солнечного ветра и ориентации межпланетных структур, поэтому весь интервал был разбит на сектора длительностью 15 мин, и для каждого сектора определялось индивидуальное время задержки, которое варьировало от 34 до 41 мин.

Интервалы магнитослоя наблюдались на фоне очень сильной отрицательной ММП *Bz* от −13 до −25 нТл, поэтому они характеризуются большими отрицательными значениями *Bz*, измеряемой на КА *GOES* в магнитослое. При этом давление солнечного ветра *Psw* варьировало от 7.4 до 16.2 нПа, а SYM-H индекс от −69 до −121 нТл. На рис. 4. видно длительное и очень сильное отрицательное ММП *Bz* на фоне относительно невысокого давления солнечного ветра *Psw* порядка 10 нПа, что характерно для межпланетных структур типа магнитного облака [23].

На рис. 4 видно, что модели неплохо предсказывают интервалы магнитослоя. Однако модели также часто показывают ошибочные интервалы магнитослоя, занижая расстояние до магнитопаузы. Особенно сильно недооценивает расстояние модель KS. Статистические параметры моделей сравниваются в первых строках табл. 4. Хорошо видно, что все модели, кроме Sh, слабо сбалансированы, их *OUR* далек от 0. Самые высокие *PCP* > 0.6 и относительно низкие *FAR* демонстрируют модели DS и PM. Самую высокую точность предсказания интервалов магнитослоя с *POD* > 0.8 показывают модели KS, Ch, DS, и Li. При этом необходимо учесть, что высокий *POD* у модели KS вызван сильной недооценкой расстояния до магнитопаузы. По совокупности наилучшие характеристики имеют модели KS, DS и PM.

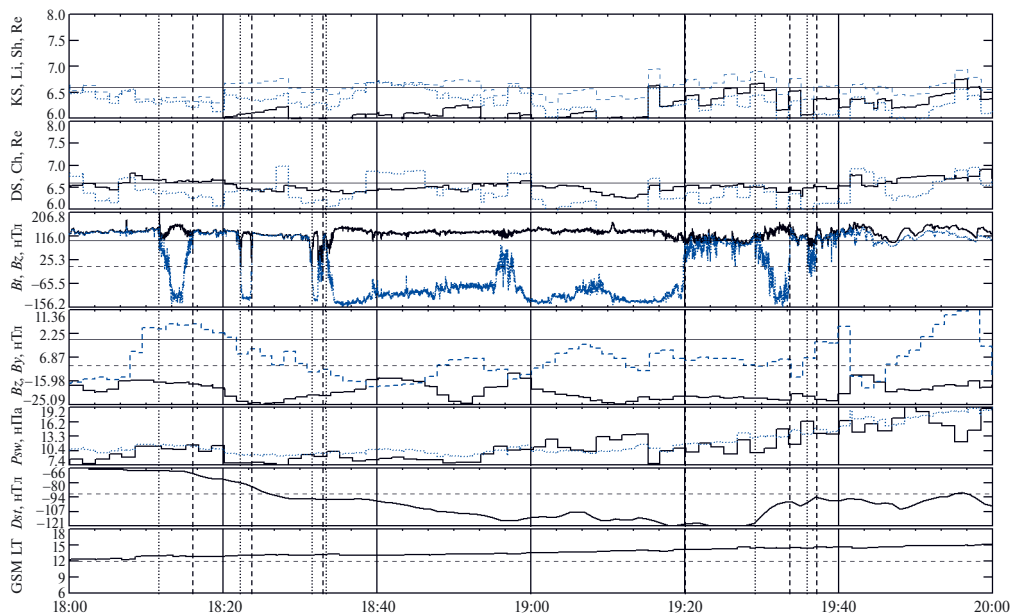


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но 23.IV.2023. Временной сдвиг 37 мин.

Таблица 4. Статистические характеристики моделей для 23.IV.2023

Модель	<i>OUR</i>	<i>FAR</i>	<i>PCP</i>	<i>POD</i>
KS-Wi	−0.957	0.464	0.544	0.979
KS-TH	−0.915	0.430	0.569	0.958
Sh-Wi	−0.162	0.471	0.509	0.586
Sh-TH	−0.733	0.399	0.603	0.883
Ch-Wi	−0.582	0.448	0.555	0.809
Ch-TH	−0.912	0.419	0.586	0.959
DS-Wi	−0.735	0.402	0.630	0.898
DS-TH	−0.969	0.394	0.630	0.987
Li-Wi	−0.733	0.507	0.463	0.851
Li-TH	−0.994	0.433	0.569	0.997
PM-Wi	0.501	0.299	0.600	0.414
PM-TH	−0.532	0.374	0.620	0.809

Интересно сравнить предсказание моделей по данным КА *THEMIS-E*, полученным непосредственно перед головной ударной волной, как показано на рис. 5. В данном случае в этой области наблюдаются более высокие давления *Psw* от 12 до 19 нПа и более экстремальные ММП *Bz* от −30 до −13 нТл. Более экстремальные условия в начале и конце интервала в 18:00–18:12 и 19:36–20:00 UT вызвали ложные интервалы магнитослоя по всем моделям. Нужно заметить, что из анализа были исключены два коротких интервала 18:30–18:36 UT и 19:27–19:30 UT, когда КА *THEMIS-E* находился в магнитослое.

Наиболее экстремальные условия в межпланетной среде наблюдались с 18:36 до 19:30 UT, когда КА *GOES-16* находился в магнитослое.

Важно заметить, что при ММП $B_z < 20$ нТл модели KS, Sh, Ch, Li и PM не реагируют на изменения *Bz* и следуют вариациям давления солнечного ветра *Psw*. Ярким примером является интервал 18:57–19:00 UT, когда отрицательный *Bz* упал до максимальных значений −30 нТл, однако модели не показывают уменьшения расстояния до магнитопаузы. Наоборот, они демонстрируют небольшое увеличение расстояния, связанное с провалом в *Psw*, так что модель Sh даже предсказывает ложный возврат магнитосферы. Такое поведение моделей объясняется тем, что они учитывают эффект насыщения воздействия ММП *Bz* вблизи −20 нТл.

Для межпланетных данных с КА *THEMIS-E* статистические параметры моделей приведены

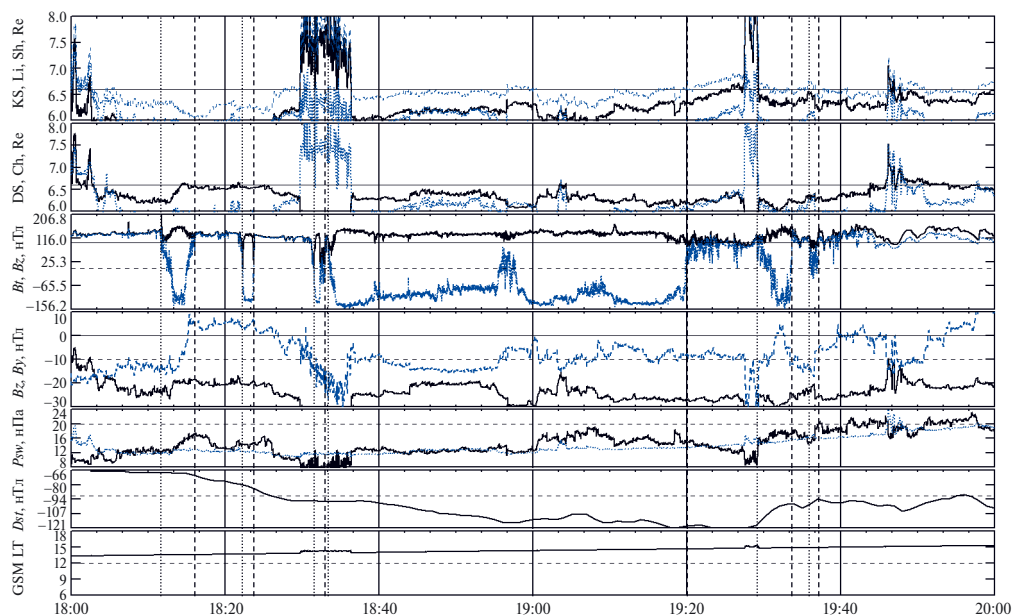


Рис. 5. То же, что на рис. 1, но 23.IV.2023. Межпланетные параметры измерялись на КА *THEMIS-E* с временным сдвигом 3 мин. Серыми прямоугольниками заштрихованы интервалы, когда *THEMIS-E* находился в магнитослое.

во вторых строчках табл. 4. Хорошо видно, что для всех моделей *OUR* ушел в большие отрицательные значения, что связано с более экстремальными межпланетными условиями. Исключением можно считать более-менее сбалансированную модель *PM*, для которой $OUR = 0.5$. Эта модель демонстрирует высокую точность $PCP = 0.62$ и рекордно низкий уровень ложных предсказаний $FAR = 0.374$, хотя предсказание магнитослоя у нее не самое лучшее $POD = 0.809$. Высокие $POD > 0.9$ у моделей *KS*, *Ch*, *DS* и *Li*. Однако это сопровождается высоким уровнем ложных предсказаний магнитослоя $FAR > 0.4$ и низкой точностью $PCP < 0.6$. Исключением является модель *DS*, у которой $FAR = 0.394$ и самая высокая точность $PCP = 0.63$. Таким образом, по совокупности всех статистических характеристик можно считать, что для межпланетных данных с КА *THEMIS-E* наилучшими являются модели *DS*, *PM* и *Sh*.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 5 для всех трех событий сведены общие характеристики межпланетных и геомагнитных условий, а также указаны наилучшие модели для каждого события и межпланетного монитора. Событие 26.II.2023 характеризуется низкой буревой активностью и средней возмущенностью в солнечном ветре с высокими давлениями P_{sw} и большими отрицательными значениями

ММП B_z . Наилучшую точность в предсказании ГПМ и интервалов магнитослоя в этом событии продемонстрировали модели *KS*, *Li* и *Sh*. Событие 23.III.2023 характеризуется очень высокими давлениями солнечного ветра, слабыми отрицательными ММП B_z и невысоким уровнем геомагнитной активности. В этом событии хорошую точность показали модели *KS*, *Li*, *PM*. Можно отметить, что оба события ГПМ были связаны с приходом к Земле межпланетного магнитослоя, т.е. структуры типа *Sheath*. В событии 23.IV.2023 интервалы магнитослоя наблюдались на фоне сильной буревой активности и очень сильных отрицательных значений ММП B_z , характерных для межпланетной структуры *MC*. В экстремальных условиях наилучшую точность дают модели *PM*, *DS*, а также *KS* и *Sh*.

Таким образом, модель *KS* продемонстрировала достаточно высокую точность в предсказании ГПМ во всех трех событиях. Модель *Li* хорошо предсказывает ГПМ в событиях с низкой буревой активностью на фоне небольших отрицательных ММП B_z . Для экстремальных событий с высокими давлениями и/или очень сильными отрицательными ММП B_z хорошую точность показывает модель *PM*. Модели *Sh* и *DS* хорошо предсказывают ГПМ во время сильной геомагнитной возмущенности на фоне сильных отрицательных ММП B_z и высоких давлений солнечного ветра.

Таблица 5. Общие характеристики событий и моделей ГПМ

Событие	P_{sw} , нПа	B_z , нТл	Dst , нТл	Модели	Структура
26.II.2023 <i>Wind</i>	13.5... 17	–10... –2	–14... –37	KS, Li	Sheath
26.II.2023 <i>THEMIS</i>	15.8... 22.4	–14... 3	–14... –37	KS, Sh, Li	
23.III.2023 <i>Wind</i>	16... 29.9	–8... 0	–35... –44	KS, Li, PM	Sheath
23.IV.2023 <i>Wind</i>	7.4... 16.2	–25... –13	–69... –121	KS, DS, PM	MC
23.IV.2023 <i>THEMIS</i>	12... 19	–30... –17	–69... –121	Sh, DS, PM	

При сравнении моделей по данным различных межпланетных мониторов необходимо учитывать их удаленность от Земли вследствие наличия в солнечном ветре мелкомасштабных структур. Очевидно, данные околоземного монитора более предпочтительны. Кроме того, нужно учитывать деградацию плазменных приборов при расчете давления солнечного ветра. Как видно в табл. 5, современный КА *THEMIS*, запущенный в 2007 г., показывает на $\sim 20\%$ более высокое P_{sw} , чем КА *Wind*, запущенный в 1994 г. Следует заметить, что основная масса ГПМ анализировалась и моделировалась с использованием межпланетных данных мониторов *Wind* и *ACE*. Их плазменные приборы деградировали, особенно на КА *ACE*, поэтому требуется дополнительная калибровка плазменных данных от удаленных межпланетных мониторов с данными околоземных КА типа *THEMIS*.

Способность предсказать ГПМ определяется также качеством модели, ее зависимостью от межпланетных параметров. В частности, показано, что модель Sh имеет тенденцию завышать расстояние до магнитопаузы при ГМП [18], что обеспечивает ей низкий *FAR*, но это также приводит и к низкому уровню предсказаний магнитослоя *POD* и большому положительному *OUR*. При нормальных условиях, наоборот, модель занижает расстояние до магнитопаузы [24]. Это связано с несбалансированной зависимостью модели от давления солнечного ветра.

Другим проблемным моментом является эффект насыщения зависимости расстояния до магнитопаузы от ММП B_z . В модели Ch порог насыщения зависит от давления солнечного ветра [13], в модели PM – от уровня геомагнитной активности [3], а в модели DS он имеет сложную зависимость от P_{sw} и B_y . Однако эта проблема до сих пор слабо исследована, поэтому модели KS, Sh и Li вводят порог как некоторую константу вблизи $B_z = -20$ нТл. В данном случае эффект насыщения хорошо проявился во время экстремальных межпланетных условий в событии 23.IV.2023 (рис. 5), когда модели KS, Sh, Li и PM не реагировали на изменения большой

отрицательной ММП B_z , следуя только вариациям давления солнечного ветра.

Точность моделей также зависит от неучтенных эффектов. Одним из них является асимметрия утро – вечер для ГПМ при больших отрицательных ММП B_z [16]. Этот эффект сильно переоценен в моделях KS и DS, вследствие чего они систематически занижают расстояние до магнитопаузы в утреннем и полуденном секторах при сильных отрицательных ММП B_z . Это приводит к большим отрицательным *OUR* и повышенным *FAR*, хотя и обеспечивает высокий уровень предсказания интервалов магнитослоя *POD*.

Другим проблемным эффектом является предыстория [17]. Хорошо известно, что текущее состояние магнитосферы определяется интегральной динамикой межпланетных условий. В частности *Dst*-вариация является интегральной функцией воздействия индуцированного электрического поля солнечного ветра [25]. В модели PM используется SYM-H как 1-минутный аналог *Dst*-вариации, который можно рассматривать как параметр, зависящий от предыстории. Как видно в табл. 5, учет данного эффекта действительно позволил избежать предсказания ложных интервалов магнитослоя, понизить *FAR* и улучшить точность модели на начальной фазе магнитных бурь.

Подытоживая, можно сказать, что сильный разброс в отклонениях предсказания моделей от наблюдений интервалов магнитослоя, связанных с ГПМ, определяется как внешними, так и внутримодельными факторами. К внешним факторам относится качество определения межпланетных условий, влияющих на магнитопаузу. Внутренними факторами являются модельные зависимости от параметров межпланетной среды и текущего состояния магнитосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По магнитным данным КА *GOES-16* и *GOES-17* были идентифицированы интервалы, когда геостационарные оказывались в магнитослое во время магнитных бурь 26 февраля, 23 марта и 23 апреля 2023 г. Для этих событий

проведен сравнительный анализ различных моделей магнитопаузы на основе данных о межпланетной среде, полученных с КА *THEMIS-E* и монитора *Wind*. Показано, что монитор *Wind* наблюдает межпланетные условия, которые могут сильно отличаться от тех, что наблюдаются на околоземном КА *THEMIS-E*. Сравнение моделей, основанное на статистических параметрах по определению интервалов магнитослоя, дало следующие результаты:

Для всех трех событий высокую точность демонстрирует асимметричная модель KS [1].

В событиях с низкой буревой активностью на фоне небольших отрицательных ММП *B_z* хорошие результаты показывает трехмерная модель Li [2].

Для экстремальных событий с очень высокими давлениями и/или очень сильными отрицательными ММП *B_z* хорошую точность показывает модель РМ [3].

При высоких давлениях солнечного ветра на фоне больших отрицательных ММП *B_z* хорошую точность демонстрируют модели Sh [4] и нейросетевая модель DS [5].

На основе сравнительного анализа показано, что на точность моделей влияют следующие факторы и эффекты:

- зависимость от давления солнечного ветра;
- эффект насыщения воздействия больших отрицательных ММП *B_z* на магнитопаузу;
- асимметрия магнитопаузы утро – вечер при больших отрицательных ММП *B_z*;
- эффект предыстории.

Дальнейшее развитие моделей ГПМ должно базироваться на более аккуратном учете этих ключевых факторов и эффектов с использованием имеющихся и новых экспериментальных данных.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен NASA/GSFC ISTR (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>) за предоставление данных по КА *Wind*, *GOES* и *THEMIS*. Автор также благодарит Мировой центр данных в Киото за предоставление индексов *Dst* и *ASY/SYM* (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aeasy/index.html>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы НИР “Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной работы заявляет, что у него нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov S.N., Suvorova A.V. An empirical model of the magnetopause for broad ranges of solar wind pressure and *B_z* IMF // Polar Cap Boundary Phenomena. NATO ASI Ser. 1998. V. 509. P. 51–61. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5214-3_5
2. Lin R.L., Zhang X.X., Liu S.Q. et al. A three-dimensional asymmetric magnetopause model // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. Art.ID. A04207. <https://doi.org/10.1029/2009JA014235>
3. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.-K. A predictive model of geosynchronous magnetopause crossings // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. Art.ID. A05208. <https://doi.org/10.1029/2010JA016208>
4. Shue J.-H., Song P., Russell C.T. et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. Iss.A8. P. 17691–17700. <https://doi.org/10.1029/98JA01103>
5. Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Three-dimensional artificial neural network model of the dayside magnetopause // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 18909–18918. <https://doi.org/10.1029/2000JA900008>
6. Dredger P.M., Lopez R.E., Collado-Vega Y.M. Comparing magnetopause predictions from two MHD models during a geomagnetic storm and a quiet period // Front. Astron. Space Sci. 2023. V. 10. Art.ID. 1213331. <https://doi.org/10.3389/fspas.2023.1213331>
7. Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.-K. et al. Anomalous dynamics of the extremely compressed magnetosphere during 21 January 2005 magnetic storm // J. Geophys. Res. Space Physics. 2014. V. 119. P. 877–896. <https://doi.org/10.1002/2013JA019534>
8. Lanzerotti L.J., LaFleur K., MacLennan C.G. et al. Geosynchronous spacecraft charging in January 1997 // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. Iss. 15. P. 2967–2970. <https://doi.org/10.1029/98GL00987>
9. Wrenn G.L., Rodgers D.J., Ryden K.A. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 953–956. <https://doi.org/10.5194/angeo-20-953-2002>

10. *Odenwald S.F., Green J.L.* Forecasting the impact of an 1859-caliber superstorm on geosynchronous Earth-orbiting satellites: Transponder resources // *Space Weather*. 2007. V. 5. Art.ID. S06002. <https://doi.org/10.1029/2006SW000262>
11. *Choi H.-S., Lee J., Cho K.-S. et al.* Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships // *Space Weather*. 2011. V. 9. Art.ID. S06001. <https://doi.org/10.1029/2010SW000597>
12. *Kuznetsov S.N., Suvorova A.V.* Solar wind control of the magnetopause shape and location. *Radiat. Meas.* 1996. V. 26. Iss. 3. P. 413–416.
13. *Yang Y.-H., Chao J.K., Dmitriev A.V. et al.* Saturation of IMF Bz influence on the position of dayside magnetopause // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. Iss. A3. <https://doi.org/10.1029/2002JA009621>
14. *Кузнецов С.Н., Суворова А.В.* Форма магнитопаузы вблизи геостационарной орбиты. *Геомаг. и аэроном.* 1997. Т. 37. № 3. С. 1–11.
15. *Кузнецов С.Н., Суворова А.В., Дмитриев А.В.* Форма и размеры магнитопаузы: Связь с параметрами межпланетной среды // *Геомаг. и аэроном.* 1998. Т. 38. № 6. С. 7–16.
16. *Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.K. et al.* Dawn-dusk asymmetry of geosynchronous magnetopause crossings // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. Art.ID. A05203. <https://doi.org/10.1029/2003JA010171>
17. *Shue J.-H., Song P., Russell C.T. et al.* Toward predicting the position of the magnetopause within geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. Art.ID. 2641. <https://doi.org/10.1029/1999JA900467>
18. *Shue J.-H., Song P., Russell C.T. et al.* Dependence of magnetopause erosion on southward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. Iss. A9. P. 18777–18788. <https://doi.org/10.1029/2001JA900039>
19. *Yang Y.-H., Chao J.K., Lin C.-H. et al.* Comparison of three magnetopause prediction models under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. Iss. A1. <https://doi.org/10.1029/2001JA000079>
20. *Dmitriev A.V., Lin R.L., Liu S.Q. et al.* Model prediction of geosynchronous magnetopause crossings // *Space Weather*. 2016. V. 14. P. 530–543. <https://doi.org/10.1002/2016SW001385>
21. *Suvorova A.V., Dmitriev A.V., Chao J.-K. et al.* Necessary conditions for the geosynchronous magnetopause crossings // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. Art.ID. A01206. <https://doi.org/10.1029/2003JA010079>
22. *Dmitriev A.V., Chao J.K., Wu D.-J.* Comparative study of bow shock models using Wind and Geotail observations // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. Iss. A12. <https://doi.org/10.1029/2003JA010027>
23. *Yermolaev Yu.I., Yermolaev M. Yu., Nikolaeva N.S. et al.* Interplanetary conditions for CIR-induced and MC-induced geomagnetic storms // *Bulg. J. Phys.* 2007. V. 34. P. 128–135.
24. *Case N.A., Wild J.A.* The location of the Earth's magnetopause: A comparison of modeled position and in situ Cluster data // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2013. V. 118. P. 6127–6135. <https://doi.org/10.1002/jgra.50572>
25. *Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. P. 4204–4214.