

---

**НАСЫЩЕНИЕ МАГНИТОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СУПЕРБУРЬ:  
НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ**

**SATURATION OF THE MAGNETOSPHERE DURING SUPERSTORMS:  
NEW RESULTS FROM THE MAGNETOGRAM INVERSION TECHNIQUE**

---

**В.В. Мишин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, vladm@iszf.irk.ru***Ю.А. Караваев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, ykar@iszf.irk.ru***V.V. Mishin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, vladm@iszf.irk.ru***Yu.A. Karavaev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, ykar@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Исследуются особенности насыщения роста площади полярной шапки при усилении солнечного ветра (СВ) по данным трех супербурь. Показано, что насыщение роста площади полярной шапки наблюдается при увеличении как динамического давления СВ, так и южной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Насыщение реализуется не только во время прохождения межпланетного магнитного облака, но и при значительном усилении плотности СВ, когда тепловое давление сравнимо с давлением ММП. Мы предполагаем, что при таких внешних условиях насыщение обусловлено в первую очередь не процессами во внешней магнитосфере (уменьшением эффективности пересоединения на дневной магнитопаузе), а конечной сжимаемостью магнитосферы — торможением сжатия магнитопаузы вследствие быстрого роста геомагнитного поля при ее приближении к Земле, т. е. внутримангнитосферной структурой геомагнитного поля. Определены признаки насыщения в зависимости от северной компоненты ММП. Мы предполагаем, что насыщение роста площади полярной шапки в зависимости от ММП существует при обоих знаках его вертикальной компоненты за счет увеличения полного давления в магнитослое. Южная компонента ММП, кроме того, проникая в магнитосферу и уменьшая геомагнитное поле, тем самым вызывает дополнительное сжатие магнитопаузы и, соответственно, рост уровня насыщения площади полярной шапки.

**Ключевые слова:** магнитосфера, солнечный ветер, полярная шапка, магнитный поток.

**Abstract.** Using data on three superstorms, we study new features of the saturation of the polar cap area growth when the solar wind (SW) increases. The saturation of the polar cap is shown to occur when the SW dynamic pressure and the southward vertical (IMF) component rise. The saturation is realized not only during the passage of interplanetary magnetic clouds, but also at significant enhancement of SW density when the SW thermal pressure is comparable with the pressure of the interplanetary magnetic field. We assume that under such conditions the saturation is caused not only by a decrease in the efficiency of reconnection at the dayside magnetopause, but mainly by a finite magnetosphere compressibility — stopping the magnetopause compression due to a rapid earthward growth of the geomagnetic field, i.e. the inner magnetospheric structure of the geomagnetic field. We have found signs of saturation depending on the northward IMF component. We assume that the IMF-dependent saturation exists for both signs of its vertical component due to an increase in the total pressure in the magnetosheath. Moreover, when penetrating into the magnetosphere and reducing the geomagnetic field, the southward IMF component causes additional compression of the magnetopause and, accordingly, an increase in the saturation level of the polar cap area.

**Keywords:** magnetosphere, solar wind, polar cap, magnetic flux.

---

## ВВЕДЕНИЕ

В магнитосфере существуют два семейства силовых линий: замкнутые, или закрытые, относятся к внутренней магнитосфере; разомкнутые, или открытые, — к внешней магнитосфере (области входного слоя на дневной границе и долям хвоста). Открытые силовые линии проецируются в околополюсную область ионосферы — полярную шапку. Через нее в ионосферу вдоль открытых силовых линий, пересоединенных с межпланетным магнитным полем (ММП), из солнечного ветра (СВ) передаются магнитный поток  $\Psi$  и поток электромагнитной энергии —

поток вектора Пойнтинга  $\mathbf{S}$ , модуль которого мы далее обозначаем через  $\epsilon'$ , следуя работе [Mishin, 1990]. Накопление магнитной энергии во время магнитосферных бурь и суббурь в долях геомагнитного хвоста приводит к росту долей, площади полярной шапки и передаваемых через нее потоков  $\Psi$  и  $\epsilon'$ , что сопровождается взрывными процессами освобождения накопленной энергии, наблюдаемыми, например, в виде полярных сияний, усиления электрических полей и токов в полярной ионосфере. Площадь полярной шапки и связанный с ней трансполярный потенциал  $U_{PC}$  при усилении СВ растут линейно с ростом южной компоненты  $B_S$  ММП или

динамического давления СВ  $P_d$  при слабом СВ. При его значительном усилении во время сильных бурь рост  $U_{PC}$  замедляется, становится нелинейным т. е. ростом медленнее линейного закона. Затем он почти останавливается после достижения критических значений: 1) межпланетных полей (электрического  $E_{CB}$  и/или южной компоненты  $B_S$  ММП) [Siscoe et al., 2002; Borovsky et al., 2009; Kan et al., 2010; Lyatsky et al., 2010; Wilder et al., 2011; Gao et al., 2013 и ссылки там], а также 2) динамического давления  $P_d$ , как это показано в [Karavaev et al., 2012a, b; Mishin et al., 2015, 2016]. Это явление замедления роста  $U_{PC}$  и  $\Psi$  было названо в литературе насыщением, соответственно, потенциала полярной шапки [Siscoe et al., 2002] и ее площади [Merkin, Goodrich, 2007]. Далее мы будем называть насыщением магнитного потока полярной шапки замедление его линейного роста в зависимости от параметров СВ. При этом под полным насыщением  $\Psi$  мы будем понимать отсутствие его роста при усилении СВ. В работе [Mishin et al., 2015, 2016] отмечена возможная связь этого явления с конечной сжимаемостью магнитосферы, а именно с тем, что ее дневная граница редко наблюдается внутри геостационарной орбиты [Shue et al., 1997, 1998; Kuznetsov, Suvovalova, 1998; Dmitriev et al., 2014]. Большая часть авторов рассматривает явление насыщения как замедление процессов переноса импульса и энергии через дневную магнитопаузу в зависимости от межпланетных полей  $E_{CB}$  или  $B_z$ . При этом часть авторов связывает насыщение с обратным влиянием ионосферы на процессы на магнитопаузе. Так, авторы работы [Siscoe et al., 2002] объясняют насыщение пересоединения там уменьшением магнитного поля из-за усиления продольных токов зоны 1, а авторы [Maltsev, Lyatsky, 1975; Kivelson, Ridley, 2008; Lyatsky et al., 2010] рассматривают насыщение переноса энергии через магнитопаузу МГД-волнами как результат увеличения проводимости ионосферы. Кроме того, явление насыщения может быть связано с кольцевым током и током в хвосте магнитосферы. В [Kalegaev et al., 2008] показано, что во время сильных бурь с  $Dst > 150$  нТл происходит насыщение тока хвоста магнитосферы и основной вклад в  $Dst$ -вариацию вносит кольцевой ток. Ясно, с другой стороны, что усиление кольцевого тока во время супербури, наряду с ростом его теплового давления может уменьшать магнитное поле внутри магнитосферы [Suvovalova et al., 2003]. Если оба этих эффекта не уравновешивают друг друга, их дисбаланс может изменить полное давление внутри магнитопаузы и повлиять на ее положение [Dmitriev et al., 2011]. Это обратное влияние кольцевого тока на положение магнитопаузы и, соответственно, параметры  $\Psi$  и  $U_{PC}$  требует проведения специального исследования, которое, однако, в задачу данной работы не входит и может быть предметом нашей дальнейшей работы.

Специально зависимость насыщения  $U_{PC}$  и  $\Psi$  от  $P_d$  обычно не рассматривалась, однако авторы работы [Siscoe et al., 2002] предположили, что уровень насыщения  $U_{PC}$  определяется уровнем  $P_d$  без какого-либо ограничения на величину последнего. В работе [Mishin et al., 2016] показано, что явление насыще-

ния проявляется одновременно в замедлении изменения потоков  $\Psi$  и  $S$ , а также расстояния до подсолнечной точки магнитопаузы в зависимости от роста как южной компоненты  $B_S$  ММП, так и  $P_d$ . Авторы предположили, что оба процесса насыщения (насыщение площади полярной шапки и конечная сжимаемость магнитосферы) взаимосвязаны, т. е. размер полярной шапки связан с размером дневной магнитосферы и ограничивается внутренней структурой геомагнитных силовых линий, привязанных к ядру Земли. В противоположность этой идее в работах [Lavraud, Borovsky, 2008; Lopez et al., 2010] замедление роста  $U_{PC}$  и  $\Psi$  связывают с процессами во внешней магнитосфере — уменьшением размера (длины  $l$ ) области пересоединения на дневной магнитопаузе при условии, что сила Ампера преобладает над градиентом теплового давления в магнитослое. Это условие может быть выполнено при малых значениях параметра  $\beta \ll 1$  (отношение теплового давления  $P$  к магнитному  $P_{mag}$ ) в магнитослое и альфвеновского числа Маха  $M_A = V_{CB} / V_A \geq 1$  (отношение скорости СВ к альфвеновской в СВ), например, во время прохождения межпланетного магнитного облака. Такая ситуация наблюдалась во время супербури 20 ноября 2003 г. Однако поведение параметров  $\beta$  и  $M_A$  было проанализировано нами только для этой супербури — одной из трех рассмотренных в работе [Mishin et al., 2016]. Поэтому по данным только одного события невозможно ответить на вопрос о природе явления насыщения — связано оно с замедлением роста размера области пересоединения на магнитопаузе или полярной шапки вследствие торможения сжатия дневной магнитосферы (см. [Mishin et al., 2016]). Для ответа на этот вопрос используем далее еще данные двух других рассмотренных нами супербурь 24–25 сентября 1998 г. и 6–7 апреля 2000 г. Во время последней  $\beta = 0.35 \div 1.8$ ,  $M_A \sim 5 \div 10$ . При столь больших значениях чисел Маха ( $M > 5$ ), когда величина параметра  $\beta \sim 1$ , согласно предположениям [Lavraud, Borovsky, 2008; Lopez et al., 2010], эффективность дневного пересоединения не должна ослабляться и тормозить рост  $U_{PC}$  и  $\Psi$ , т. е. насыщение  $\Psi$  не должно наблюдаться.

Структура работы следующая. В разделе 1 мы описываем базу данных и методы обработки, в разделе 2 дан анализ поведения параметров СВ и ММП в ходе исследуемых супербурь, показаны особенности насыщения магнитного потока полярной шапки  $\Psi$  в зависимости от межпланетных электрического и магнитного полей и параметров СВ, определяющих насыщение  $\Psi$ . В разделе 3 обсуждаются полученные результаты.

## 1. БАЗА ДАННЫХ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В работе использованы данные трех супербурь: 24–25 сентября 1998, 6–7 апреля 2000 и 20 ноября 2003 г., которые изучались ранее в работах [Russell et al., 2000; Huttunen et al., 2002; Alex et al., 2006] и затем в серии работ [Karavaev et al., 2012a, b; Mishin et al., 2015, 2016]. Спутниковые данные о параметрах СВ взяты с сайта [http.gsfc.cdaw.gov].

Геомагнитные данные наземной сети  $\geq 110$  наземных магнитометров Северного полушария были обработаны оригинальной техникой инверсии магнитограмм (ТИМ) [Mishin, 1990, 1991]. На рис. 1 показаны полученные ТИМ карты распределения плотности продольных токов (field aligned currents, FAC) в полярной ионосфере для бури 6–7 апреля 2000 г. Толстые сплошные линии показывают границы областей продольных токов  $R_1$ ,  $R_2$  и полярной шапки  $R_0$  в соответствии с классификацией [Iijima, Potemra, 1978]. По картам распределения плотности FAC мы определяем границы полярной шапки  $R_0$  каждую минуту и рассчитываем временные ряды переменной части магнитного потока полярной шапки  $\Psi_1(t) = \Psi(t) - \Psi_0$ , равной разности полного потока через полярную шапку и его значения для спокойного интервала перед бурей  $\Psi_0$ , которое для трех анализируемых событий составляло от 0.17 до 0.30 ГВб. При этом полный магнитный поток  $\Psi$  через полярную шапку  $R_0$  рассчитывается как поверхностный интеграл  $\Psi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ , где  $\mathbf{B}(r)$  — дипольное геомагнитное поле,  $S$  — площадь сферического сегмента внутри границы зоны  $R_0$  на высоте  $r = 115$  км. Кроме того, в методе ТИМ рассчитывается поток вектора Пойнтинга как функция переменного магнитного потока  $\varepsilon' \sim \Psi_1^2$  через площадь полярной шапки [Mishin et al., 2000, 2011, 2014]. Подчеркнем, что мы используем получаемую ТИМ поверхность полярной шапки, а не предполагаемую, но не измеряемую на спутниках длину области пересоединения  $l_0$  на магнитопаузе, как это часто делается при расчете потока Пойнтинга  $\varepsilon$  методом, приведенном в [Perrault, Akasofu, 1978].

## 2. ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СВ И НАСЫЩЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ

### 2.1. Изменения параметров СВ

Изменения параметров СВ во время трех супербури иллюстрируют табл. 1 и рис. 2–4.

В таблице приведен диапазон (размах) наблюдавшихся значений компонент ММП и параметров СВ: скорости  $V_{CB}$  (км/с), плотности  $n$  ( $\text{см}^{-3}$ ), динамического давления  $P_d$  (нПа), электрического поля пересоединения  $E_m$  [Kan, Lee, 1979], индекса  $AE$ , а также минимальные значения индекса  $SUM-H$  (нТл).

На рис. 2–4 показано изменение основных параметров СВ для каждой из трех бурь. Во время внезапного начала (sudden commencement, SC) всех бурь значения параметров СВ одновременно резко увеличиваются, причем во время бури 24–25.09.1998 радиальная компонента ММП становится больше нерадиальной ( $B_x > B_{yz}$ , рис. 3, в) и увеличивает модуль ММП  $\sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$  и, соответственно, его магнитное давление  $P_B \propto B^2$ . После SC скорость СВ  $V_{CB}$  очень медленно уменьшается (панель а). На панели в показаны изменения нерадиальной компоненты ММП  $B_{yz} = \sqrt{B_y^2 + B_z^2}$  и электрического поля пересоединения, проникающего в магнитосферу:

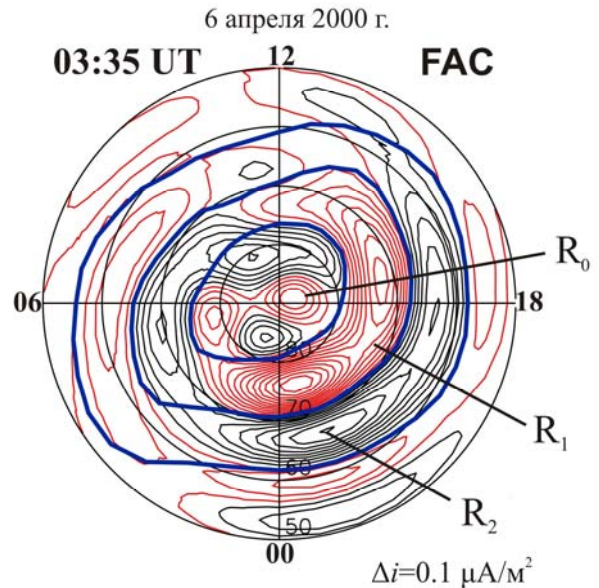


Рис. 1. Карты распределения FAC в северной высокоширотной ионосфере в геомагнитных дипольных координатах (MLT — геомагнитная широта), полученные ТИМ с разрешением 1 мин Красный (черный) цвета показывают вытекающие (вытекающие) токи. Синие сплошные линии показывают границы между зонами  $R_1$ ,  $R_2$  и полярной шапки  $R_0$

$$E_m = V_{CB} B_{yz} \left( \sin \frac{\theta}{2} \right)^2,$$

где  $\theta = \arctan(B_y / B_z)$  [Kan, Lee, 1979].

После SC супербури 20.11.2003 г. наблюдалась область сжатого СВ в течение нескольких часов — повышение плотности  $n$  ( $> 20 \text{ см}^{-3}$ ), динамического давления СВ ( $P_d > 20$  нПа) и параметра  $\beta \sim 1-2$ . При этом ММП было южным:  $-10 \text{ нТл} < B_z < -5 \text{ нТл}$ . Затем (после 10:30 UT) область сжатого СВ закончилась — произошло резкое падение  $n$ ,  $P_d$  и  $\beta$ , на фоне этого в течение более 1 ч ММП было направлено на север с усилением его модуля до 20 нТл. Далее наблюдалась типичная для прохождения межпланетного магнитного облака ситуация — экстремально сильное южное ММП, давление которого было намного больше теплового ( $\beta < 0.1$ ), несмотря на высокий средний уровень динамического давления  $P_d \sim 10$  нПа и его усиления в 1.5 раза. Перед ударным фронтом бури 24.09.1998 г. и на нем наблюдалось увеличение плотности СВ, когда достигались большие значения параметра  $\beta \geq 1$ . Затем после прохождения ударного фронта наблюдалась область сжатия с большими значениями параметра  $\beta \sim 0.5 \div 1$ . Однако сразу после фронта в области сжатия ММП  $B_z$  было положительным и перед спадом плотности СВ повернулось на юг. Его значения были не очень велики ( $B_S \sim 10$  нТл), но значение параметра  $\beta$  в СВ было малым  $< 0.1$  и оставалось таковым даже при резком скачке динамического давления СВ около 07 UT, когда число Маха увеличилось до значения  $M_A \sim 7$ . Поворот ММП на север около 15:40 UT привел к падению активности  $AE$ . В начале третьей бури 06.04.2000 г. после скачка всех параметров СВ на фронте, вызвавшем бурю, дополнительного усиления динамического давления сразу после прохождения фронта (что видно

Параметры Дата	$B_x$ , нТл	$B_y$ , нТл	$B_z$ , нТл	$V_{CB}$ , км/с	$n$ , см <sup>-3</sup>	$P_d$ , нПа	$E_m$ , мВ/М	$AE$ , нТл	$SYM-H$ , нТл
24–25.09.1998 г.	-23÷35	-14÷39	-23÷23	650÷850	1÷28	0.5÷28	0÷17	73÷2865	≤-300
06–07.04.2000 г.	-10÷23	-30÷8	-29÷21	346÷636	2.5÷57	0.6÷31	0.6÷16	22÷2000	≤-300
20.11.2003 г.	-20÷19	-26÷44	-53÷30	433÷754	2.9÷33	1.8÷27	0.2÷34	13÷3250	≤-450

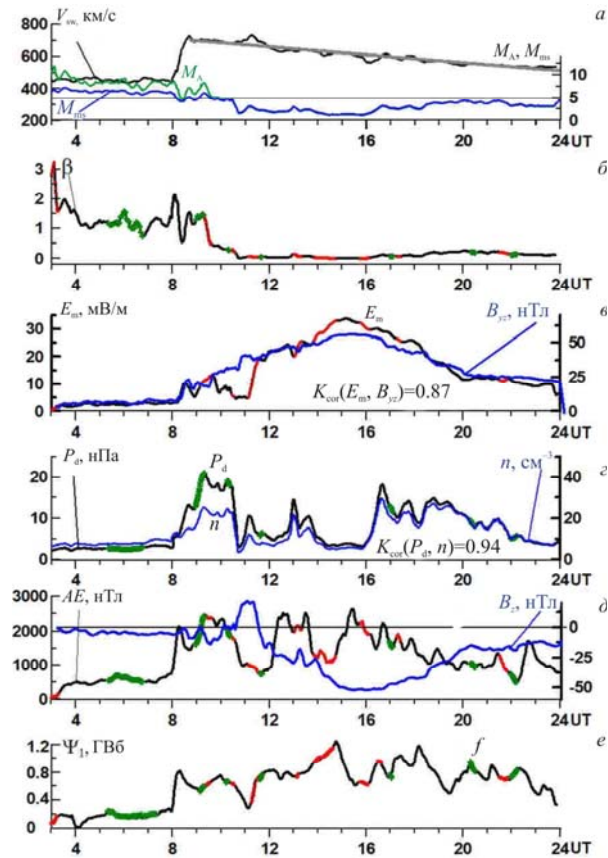


Рис. 2. Супербуря 20.11.2003 г. Вариации параметров СВ: скорости  $V_{CB}$  (черная линия — квазилинейная аппроксимация), альфвеновского  $M_A$  и магнитозвукового  $M_{ms}$  чисел Маха (зеленая и голубая линии) (а); параметра  $\beta$  (б); электрического поля пересоединения (merging electric field)  $E_m$  (черная линия, сглажена по 15-минутным интервалам), нерадиального ММП  $B_{yz}$  (синяя линия, внизу — коэффициент корреляции между  $E_m$  и  $B_{yz}$ ) (в); динамического давления СВ  $P_d$  (черная линия) и концентрации протонов СВ  $n$  (синяя линия, сглажена по 15-минутным интервалам, внизу — коэффициент корреляции между  $P_d$  и  $n$ ) (г); индекса  $AE$  (черная линия, сглажена по 15-минутным интервалам) и компоненты ММП  $B_z$  (синяя линия) (д); переменной части магнитного потока полярной шапки  $\Psi_1$  ( $\Psi_0=0.3$  ГВб) (е). На черных кривых б–е цветом выделены интервалы UT, выбранные при расчете коэффициентов  $d_1=\partial\Psi_1/\partial E_m$  (красные отрезки) и  $d_2=\partial\Psi_1/\partial P_d$  (зеленые отрезки)

во время других бурь) не наблюдалось, динамическое давление было высоким (10–15 нПа),  $B_z$  ММП отрицательной (около -20 нТл) и параметр  $\beta$  конечным ( $\beta\sim 0.4$ ). В середине главной фазы бури 6 апреля 2000 г. (около 24 UT) ММП повернулось на север и поле  $E_m$  упало. Во время поворота и вскоре после него наблюдались сильные импульсы динамического и теплового давления СВ, когда значения  $\beta$  превышали 1.

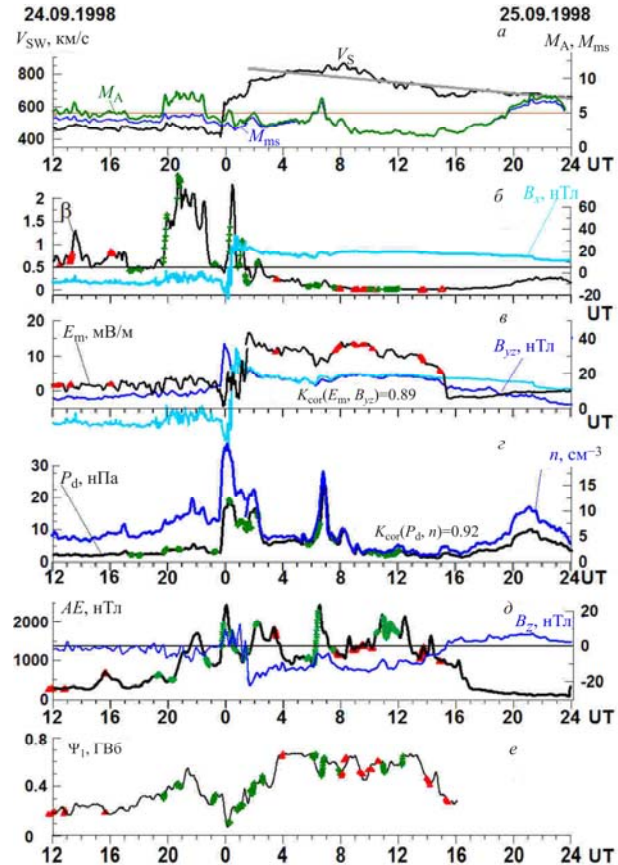


Рис. 3. То же, что на рис. 2 для супербури 24–25.09.1998 г. Дополнительно на панелях б и в голубым цветом показано поведение компоненты  $B_x$  ММП, которая после SC превысила компоненту  $B_{yz}$

Величина  $AE$ -индекса при этом упала вдвое, но продолжала быть достаточно высокой ( $AE\sim 500$  нТл) на фоне повышенного уровня давления  $P_d\sim 10$  нПа.

Проведенный нами корреляционный анализ показал, что после SC в периоды высокой активности в течение всех бурь поле пересоединения  $E_m$  изменяется в основном за счет изменения нерадиальной компоненты  $B_{yz}$  ММП с коэффициентом корреляции  $K_{cor}(E_m, B)=0.78\div 0.87$ , в то время как изменения  $P_d$  СВ обусловлены преимущественно изменениями плотности  $n$  с  $K_{cor}(P_d, n)=0.92\div 0.98$ . Корреляции между  $P_d$  и  $E_m$  практически не было:  $K_{cor}(P_d, E_m)\leq 0.25$ . Исключение составил короткий интервал 10:31–11:15 UT сразу после прохождения области сжатия за ударным фронтом бури 2003 г., когда вместе с поворотом ММП на север одновременно наблюдались положительные импульсы  $P_d$  и  $E_m$  с коэффициентом корреляции  $K_{cor}(P_d, E_m)=0.68$ . Поэтому за исключением этого интервала в течение всех трех супербурь после SC параметры  $E_m$  и  $P_d$  могут быть приняты в качестве независимых переменных.



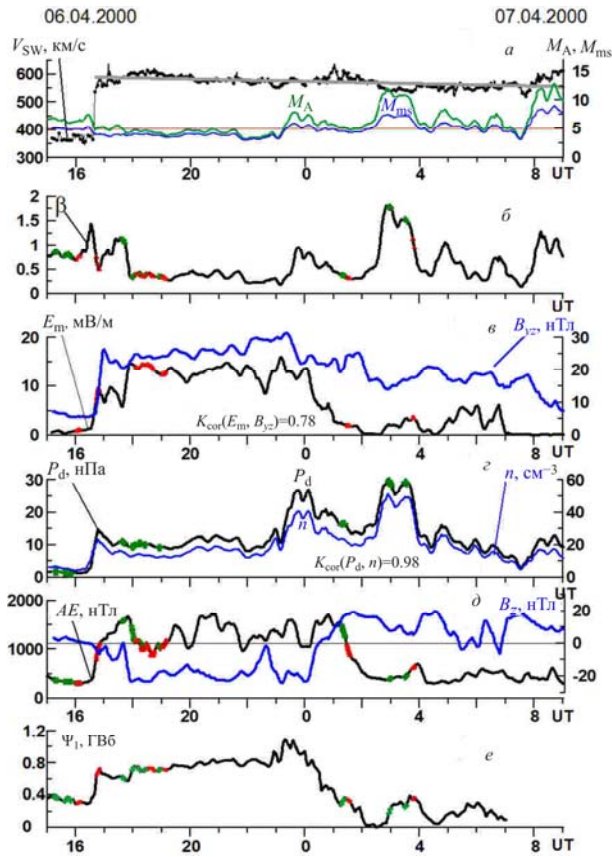


Рис. 4. Супербури 6–7 апреля 2000 г. Обозначения те же, что на рис. 2

**2.2. Насыщение магнитного потока полярной шапки**

Как было отмечено во введении, в работе [Mishin et al., 2016] было рассмотрено также поведение в СВ параметра  $\beta = P/P_B$  ( $P$  — тепловое,  $P_B$  — магнитное давление в СВ), а также чисел Маха: альфвеновского  $M_A = V_{CB}/V_A$  и магнитозвукового  $M_{ms} = V_{CB}/V_{ms}$ , здесь  $V_A$  и  $V_s$  — альфвеновская и звуковая скорости,  $V_{ms} = \sqrt{V_A^2 + V_s^2}$  — быстрая магнитозвуковая скорость. Был сделан вывод о том, что насыщение роста магнитного потока  $\Psi$  и потока вектора Пойнтинга  $e'$  через полярную шапку происходит при умеренных значениях параметра  $\beta < 0.5$  и числа Маха  $M_{ms} < 5$ , что соответствует предположению [Lavraud, Vogovsky, 2008; Lopez et al., 2010] о том, что насыщение связано с уменьшением эффективного пересоединения на дневной магнитопаузе в результате замедления роста длины линии пересоединения под действием силы Ампера (точнее, максвелловых натяжений). Поведение чисел Маха и параметра  $\beta$  было показано, однако, только для одного события — бури 20.11.2003 г. Здесь мы проведем детальный анализ поведения всех параметров СВ и магнитного потока полярной шапки  $\Psi$  и проверим, наблюдалось ли насыщение — замедление роста магнитного потока  $\Psi$  — во время трех исследуемых супербурь, особенно в те периоды, когда значения чисел Маха были большими, а параметра  $\beta$  — конечными, т. е.  $\beta \leq 1$ .

Для этого мы будем рассматривать две зависимости производных магнитного потока полярной шапки  $\Psi_d$  ( $\partial\Psi_1/\partial P_d$  и  $\partial\Psi_1/\partial E_m$ ) от соответствующих

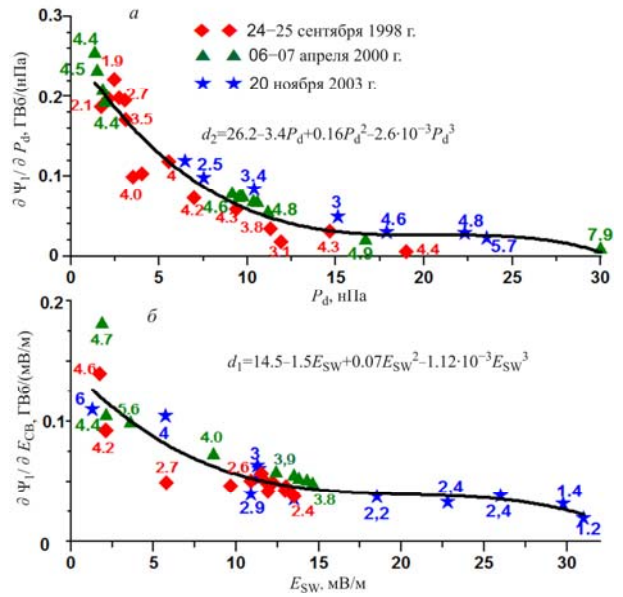


Рис. 5. Производные  $\partial\Psi_1/\partial P_d$  (а) и  $\partial\Psi_1/\partial E_m$  (б) как функции  $P_d$  и  $E_m$  во время трех супербурь. Ромбики, треугольники и звездочки отмечают интервалы преобладающего изменения  $P_d$  (панель а) и  $E_m$  (панель б), отмеченные на рис. 2–4. Цифры над ними показывают средние значения магнитозвукового числа Маха  $M_{ms}$

переменных  $E_m$  и  $P_d$ . На рис. 5 показаны уточненные и дополненные по данным бурь 1998 и 2000 г. зависимости по сравнению с полученными нами ранее (см. рис. 4 в [Mishin et al., 2016]). Интервалы преобладающего изменения параметров СВ  $P_d$  или  $E_m$ , которые показаны на рис. 2–4 соответственно зеленым или красным. В [Mishin et al., 2016] был использован критерий выбора интервалов, согласно которому в каждом отобранном интервале с длиной от 10 до 40 мин наблюдаемые монотонные изменения значения  $\Psi_1$  с размахом в разы больше вероятной ошибки его измерения обусловлены монотонными изменениями одной из переменных  $E_m$  или  $P_d$  на фоне квазипостоянства другой. Далее с использованием метода наибольших вкладов [Bazarzharov et al., 1976; Mishin, 1990] на каждом выбранном интервале рассчитывалась соответствующая производная  $\partial\Psi_1/\partial P_d$  или  $\partial\Psi_1/\partial E_m$ .

На рис. 5 видно, что замедление изменения функций  $\Psi_1(P_d)$  и  $\Psi_1(E_m)$ , т. е. уменьшение производных  $\partial\Psi_1/\partial P_d$  и  $\partial\Psi_1/\partial E_m$ , происходит при увеличении переменных  $P_d$  и  $E_m$ . Можно предположить, что правая часть этих графиков — область минимальных значений — соответствует насыщению функций  $\Psi_1(P_d)$  и  $\Psi_1(E_m)$ . Встает вопрос о степени насыщения в области малых значений  $P_d$  и  $E_m$ , когда производные могут быть большими. Для ответа на этот вопрос рассмотрим еще (рис. 6–8) зависимости альфвеновского числа Маха и потока  $\Psi$  от параметров СВ  $E_m$ ,  $B_z$  и  $P_d$ , которые мы получили по временным рядам значений наблюдаемых параметров СВ ( $E_m$ ,  $B_z$  и  $P_d$ ) и магнитного потока полярной шапки с помощью ТИМ. Предварительно отметим, что почти все временные интервалы, на которых производные  $\partial\Psi_1/\partial P_d$  и  $\partial\Psi_1/\partial E_m$  имели самые большие значения (самая левая часть графиков на рис. 5 ( $\partial\Psi_1/\partial P_d < 3$  нПа,  $\partial\Psi_1/\partial E_m < 3.5$  мВ/м) с большим

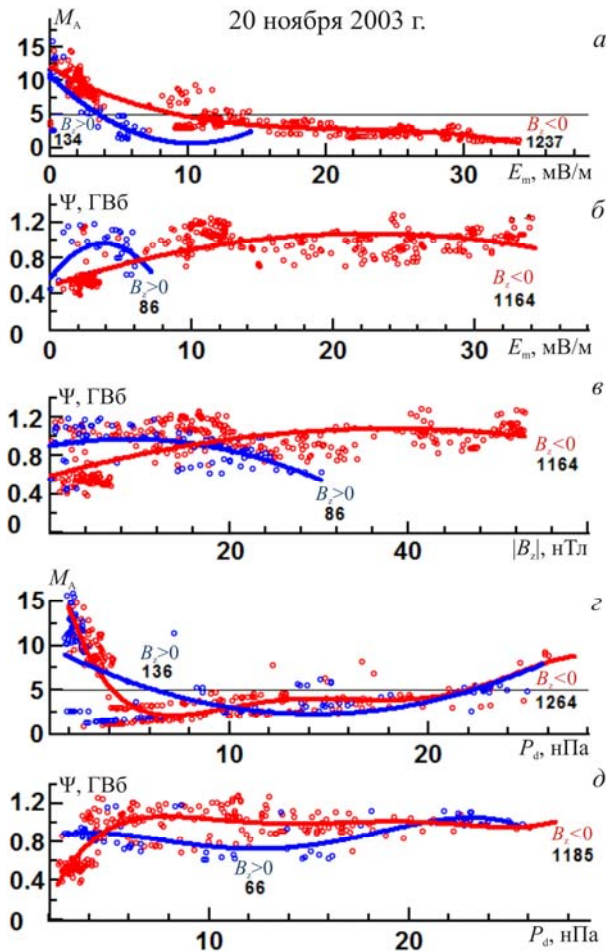


Рис. 6. Буря 20.11.2003 г. Значения альфвеновского числа Маха  $M_A$  и магнитного потока полярной шапки  $\Psi(t) = \Psi_1(t) + \Psi_0$  в зависимости от  $E_m$ ,  $B_z$  и  $P_d$  (кружки) и их аппроксимации полиномами, показанные сплошными линиями соответственно красным цветом для направления ММП на юг, синим — на север. Цифры (черный шрифт) под символами  $B_z > 0$  и  $B_z < 0$  показывают количество точек в выборках. Значение потока  $\Psi$  до бури составляло  $\Psi_0 = 0.3$  ГВб

значением числа Маха  $M_{ms} \sim 4-6$ , соответствуют периодам времени перед началом бурь, на насыщение во время бурь не влияют и поэтому далее мы о них говорить не будем.

2.2.1. Насыщение при росте динамического давления

Сразу после начала бури 20.11.2003 рост давления на переднем (при южном ММП) и заднем (при северном ММП) краях области сжатия СВ (рис. 2, г) сопровождается монотонным спадом производной  $\partial\Psi_1/\partial P_d$  (рис. 5, а). При этом большие значения  $\beta \geq 1$  и  $M_A \geq 5$ , вызванные скачком давления до величины  $P_d > 26$  нПа на интервале 09–10 UT, не только не нарушают монотонность спада потока  $\Psi$  на фоне малых значений  $\beta = 0.02 \div 0.3$ , но и приводят к уменьшению производной  $\partial\Psi_1/\partial P_d$ . На графике  $\Psi(P_d)$  (рис. 6, д) виден практически постоянный уровень значений  $\Psi$  при росте  $P_d$  от 4 до ~25 нПа. Во время бури 1998 г. (рис. 3) резкие усиления давления  $P_d$  до значений  $> 20$  нПа, наблюдавшиеся как в области сжатого СВ за ударным фронтом при  $\beta \sim 1$ , так и в интервале 06:07 UT 25.09.1998 (когда  $\beta \leq 0.4$ ,

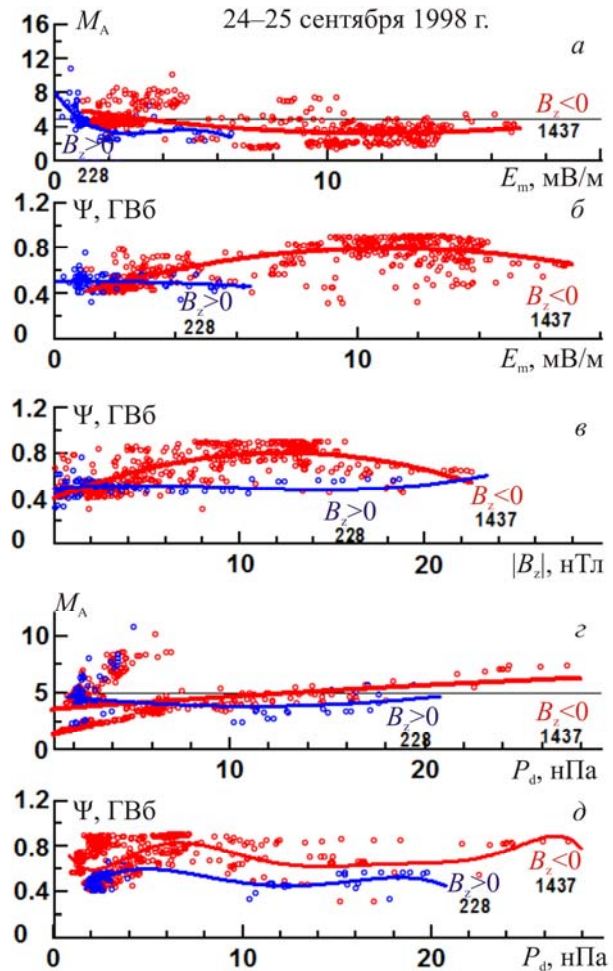


Рис. 7. Супербуря 24–25.09.1998. Обозначения те же, что на рис. 6, для  $\Psi_0 = 0.24$  ГВб

$M_A \sim 7$ ) не вызвали резкого увеличения значений  $\Psi$  и  $\partial\Psi_1/\partial P_d$  (рис. 5, 7). Важно отметить наличие во всех событиях двух уровней насыщения: более высокого при южном ММП и менее высокого при северном (рис. 6, е – 8, е). Наибольшая разница между ними наблюдается во время бури 06.04.2000, когда мощные импульсы  $P_d$  до и после поворота ММП на север и резкого спада потока  $\Psi$  сопровождалась резкими увеличениями значений параметра  $\beta$  и числа Маха. Наблюдавшиеся при этом краткие возращения потока  $\Psi_1$  (рис. 4) не вызвали нарушения насыщения  $\Psi_1(P_d)$  — повышения уровней  $\Psi$  при обоих знаках  $B_z$  (рис. 8, е) и отклонения от падающей кривой  $\partial\Psi_1/\partial P_d(P_d)$  (рис. 5, а). Таким образом, даже в периоды значительного увеличения чисел Маха и параметра  $\beta$  явление насыщения не нарушается. Более того, во время бури 06–07.04.2000 скачок  $P_d$  привел не к росту производной  $\partial\Psi_1/\partial P_d$ , т. е. срыву насыщения, а к ее значительному уменьшению  $\partial\Psi_1/\partial P_d \rightarrow 0$ , т. е. практически к полному насыщению  $\Psi_1(P_d)$ . Это наглядно видно на рис. 5. Точка на правом краю рис. 5, а соответствует минимальному значению  $\partial\Psi_1/\partial P_d < 0.01$  при  $M_{ms} > 7$ , т. е. наибольшему замедлению роста  $\Psi_1$ . Лежащие рядом точки — синие звездочки со значениями  $M_{ms} = 4.6 \div 5.7$  — соответствуют также интервалу сжатого СВ в начале бури 2003 г. ( $\beta \geq 1$  и  $M_A \geq 5$ ), описанному в начале данного параграфа. Таким образом, не вызывает сом-



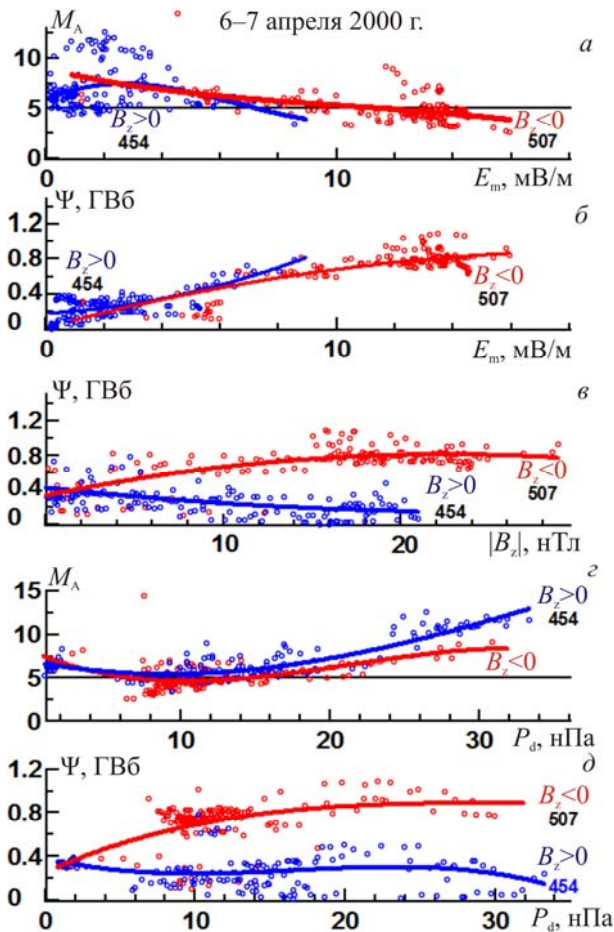


Рис. 8. Супербури 06–07.04.2000 г. Обозначения те же, что на рис. 6, для  $\Psi_0=0.17$  ГВб

нения наличие насыщения магнитного потока полярной шапки в зависимости от динамического давления СВ не только при малых значениях чисел Маха и параметра  $\beta$  в СВ, но и при их резких увеличениях во время импульсов  $P_d$ , наблюдавшихся во время всех рассмотренных бурь при обоих знаках  $B_z$  ММП.

### 2.2.2. Насыщение при росте южного ММП и электрического поля пересоединения

На рис. 6–8 показана зависимость потока  $\Psi$  от электрического  $E_m$  и магнитного  $B_z$  полей (панели б, в). На панелях в легко увидеть наличие насыщения потока  $\Psi$  относительно роста модуля  $B_z$  ММП при ее обоих знаках: при северном ММП насыщение наступает уже при малых значениях  $B_z \geq 1 \div 3$  нТл, а при южном ( $B_z < 0$ ) — при достаточно больших значениях модуля  $B_s = |B_z| = 10 \div 20$  нТл. Отметим также, что уровень значений  $\Psi$  при северном ММП значительно ниже, чем при южном (как это было отмечено в предыдущем параграфе). Таким образом, насыщение магнитного потока полярной шапки относительно роста вертикальной компоненты ММП наблюдается для всех трех бурь без каких-либо ограничений на значения чисел Маха и параметра  $\beta$ .

Не так однозначно, однако, обстоит дело с зависимостью  $\Psi(E_m)$ . Во время бурь 2003 и 1998 г., когда магнитное давление в СВ преобладало над тепловым и значения чисел Маха были умеренными ( $M < 5$ ), функция  $\Psi(E_m)$  достигает максимума в сере-

дине диапазона наблюдаемых значений поля  $E_m$  и затем спадает с ростом  $E_m$  (рис. 6, б; 7, б). Во время бури 2000 г., когда тепловое давление в СВ было порядка магнитного, а значения чисел Маха большими, функция  $\Psi(E_m)$  не успела достичь своего максимума и полного насыщения относительно  $E_m$  не наблюдалось. Однако частичное насыщение, т. е. замедление скорости роста  $\Psi(E_m)$ , о котором обычно говорят другие авторы (см. Введение), видно на рис. 8, б уже при  $E_m=6$  мВ/м при южном ММП (красная кривая), и затем эта функция становится еще более пологой. Если дополнительно рассмотреть поведение графика зависимости производной  $\partial\Psi_1/\partial E_m$  от поля  $E_m$  (рис. 5, б), можно увидеть, что последние пять точек, представляющие бурю 2000 г., (зеленые треугольники) лежат в самом начале пологого участка аппроксимирующей кривой насыщения, где  $\partial\Psi_1/\partial E_m$  не опускается ниже 0.05 ГВб/(мВ/м) в отличие от двух других бурь.

Поэтому во время бурь 06–07.04.2000 мы имеем менее эффективное замедление роста функции  $\Psi=\Psi(E_m)$  (рис. 8, в).

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Приведенные выше результаты показывают некоторую неоднозначность поведения производных  $\partial\Psi_1/\partial P_d$  и  $\partial\Psi_1/\partial E_m$  во время резкого усиления давления  $P_d$  и параметра  $\beta$ . Рисунки 6–8 проясняют картину насыщения. Они показывают поведение альфеновского числа Маха и потока  $\Psi$  в зависимости от параметров СВ  $E_m$ ,  $B_s$  и  $P_d$ . Видно, что во всех трех изученных супербури наблюдается насыщение  $\Psi$  в зависимости от южной компоненты ММП и динамического давления СВ. На режим насыщения кривая зависимости  $\Psi(E_m)$  вышла в случае двух супербурь 1998 и 2003 г., вызванных прохождением магнитных облаков, когда величина  $E_m$  достигала больших значений (15–30 мВ/м). Однако во время супербури 06.04.2000 насыщение  $\Psi(E_m)$  было не полным (слабым), по-видимому, из-за поворота ММП на север, остановки роста  $E_m$  на уровне  $\sim 13$  мВ/м и завершения активной фазы бури (см. 2.2.2). Подчеркнем здесь, что насыщение  $\Psi$  относительно роста южной компоненты  $B_s$  ММП, при этом было достигнуто. После достижения максимума наблюдался спад кривой  $\Psi(B_s)$  при дальнейшем росте  $B_s$  для всех событий (красные кривые на рис. 6, в – 8, в). Важно добавить здесь, что синие кривые на этих же рисунках показывают, что насыщение  $\Psi(B_z)$  происходит и при северном ММП. По крайней мере, во всех анализируемых событиях не наблюдается рост потока  $\Psi$  при росте северного ММП.

Полученное нами во всех событиях насыщение потока  $\Psi(P_d)$  при обоих знаках  $B_z$  и повышение его уровня при повороте ММП с севера на юг (рис. 6, е – 8, е) соответствует наблюдаемому [Kovner, Feldstein, 1973; Shue et al., 1998; Dmitriev et al., 2014] дополнительному сжатию магнитопаузы при таком повороте и нашему предположению [Mishin et al., 2016] о связанном с ним увеличении площади полярной шапки. Наличие насыщения  $\Psi(P_d)$  при

северном ММП, когда влияние дневного пересоединения минимально, наиболее отчетливо видно во время бури 2000 г., когда большие импульсы давления  $P_d$  наблюдались после поворота ММП на север, а также сразу после SC во время прохождения области сжатого СВ во время двух других бурь 2003 и 1998 г. Пересечение уровней насыщения  $\Psi$  при разных знаках  $B_z$  (панели  $\epsilon$  и  $\delta$  на рис. 6) соответствует интервалу поворота ММП на север после прохождения области сжатия после SC, когда изменения  $E_m$  и  $P_d$  нельзя считать независимыми (см. параграф 2.1). Особенно отметим еще следующий факт: на кривых  $\epsilon$  рис. 6–8 виден рост числа Маха, которое достигает значений  $M_A \sim 6$ –10 во время события 2000 г. и  $M_A \sim 8$  во время бури 2003 г. при обоих знаках  $B_z$ , когда достигается полное насыщение функции  $\Psi(P_d)$ , т. е. отсутствие роста  $\Psi$  при больших значениях  $P_d$  (кривые  $\epsilon$ ). Наличие насыщения при северном ММП, хотя и на более низком уровне  $\Psi$ , чем при южном ММП, свидетельствует в пользу нашего предположения о торможении расширения полярной шапки нарастающим при сжатии магнитопаузы давлением геомагнитного поля за счет привязки геомагнитных силовых линий к ядру Земли, что проявляется на более высоких широтах и на меньшем уровне геомагнитной активности. Этот конечный достаточно высокий уровень насыщения  $\Psi(B_z > 0) = 0.3 \div 0.8$  ГВб объясняется тем, что положительная компонента ММП  $B_z$  увеличивает модуль ММП и полное внешнее давление  $\hat{P} = P + P_B$  в магнитослое за счет магнитного давления  $P_B$  и тем самым усиливает сжатие магнитосферы и расширение полярной шапки. При повороте на юг, помимо увеличения магнитного давления вне магнитопаузы, ММП оказывает дополнительное воздействие, проникая в магнитосферу и уменьшая геомагнитное поле, тем самым вызывая дополнительное смещение магнитопаузы к Земле [Kovner, Feldstein, 1973] и рост уровня насыщения потока  $\Psi$ .

Итак, во время рассмотренных супербурь наблюдается насыщение потока  $\Psi$  при росте не только южной компоненты ММП и электрического поля пересоединения, но и северной компоненты ММП, а также давления  $P_d$ , сопровождаемое ростом альфвеновского числа Маха до значений  $M_A = 5 \div 10$ . Это противоречит следующим предположениям: 1) о неограниченном росте трансполярного потенциала с ростом  $P_d$  [Siscoe et al., 2002]; 2) о том, что насыщение может наблюдаться только относительно роста параметров  $E_m$  и  $B_s$  при прохождении магнитных облаков и только при малых значениях числа Маха [Lavraud, Borovsky, 2008; Lopez et al., 2010]. Поэтому вызывает сомнение объяснение [Lavraud, Borovsky, 2008; Lopez et al., 2010] явления насыщения как следствия только ослабления эффективности дневного пересоединения. Для проверки наших выводов требуются дальнейшие исследования по спутниковым и наземным данным с проведением детального регрессионного анализа и модельных экспериментов для условий супербурь, когда как  $P_d$ , так и вертикальная компонента ММП (причем обоих знаков), достигают достаточно больших значений и выполняются условия насыщения.

Мы благодарны В.М. Мишину, С.Б. Лунюшкину за интерес к работе и ценные замечания, а также М.А. Курикаловой за проведение расчетов по буре 6 апреля 2000 г. Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 15-05-05561, 17-52-44001 и № 18-55-53008. Параметры солнечного ветра и геомагнитные индексы  $AE$  и  $SYM-H$  взяты с сайтов: [http://cdaweb.gsfc.nasa.gov] и Kyoto WDC Website, геомагнитные данные получены из международных проектов CARISMA, INTERMAGNET, GIMA, MACCS, IMAGE, SuperDARN, руководитель магнитных обсерваторий О.А. Трошичева (ААНИИ), Е.П. Харина (МСД Б), Б.М. Шевцова и А.В. Винницкого (ИКИР ДВО РАН), Д.Г. Баишева (ИКФИА СОРАН), С. Хомутова (обс. «Новосибирск»), О. Кусонского (обс. «Арти»), Danish Meteorological Institute. Экспериментальные данные получены также с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alex S., Mukherjee S., Lakhina G.S. Geomagnetic signatures during the intense geomagnetic storms of 29 October and 20 November 2003 // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2006. V. 68, N 7. P. 769–780. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.01.003.
- Bazarshapov A.D., Mishin V.M., Shpynev G.B. A Mathematical Analysis of Geomagnetic Variation Fields // *Gerlands Beitr. Geophysik.* 1976. V. 85, N 1. P. 76–82.
- Borovsky J.E., Lavraud B., Kuznetsova M.M. Polar cap potential saturation, dayside reconnection, and changes to the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A03224. DOI: 10.1029/2009JA014058.
- Dmitriev A., Suvorova A., Chao J.-K. A predictive model of geosynchronous magnetopause crossings // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, A05208. DOI: 10.1029/2010JA016208.
- 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.* 2014. V. 119, N 2. P. 877–896. DOI: 10.1002/2013JA019534.
- Gao Y., Kivelson M.G., Walker R.J. Two models of cross polar cap potential saturation compared: Siscoe—Hill model versus Kivelson—Ridley model // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2013. V. 118, N 2. P. 794–803.
- Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I., et al. April 2000 magnetic storm: Solar wind driver and magnetospheric response // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A12. P. 1440.
- Iijima T., Potemra T.A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83, N A2. P. 599–615.
- Kalegaev V.V., Makarenkov E.V. Relative importance of ring and tail currents to  $Dst$  under extremely disturbed conditions // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 519.
- Kan J., Lee L. Energy coupling function and solar wind magnetosphere dynamo // *Geophys. Res. Lett.* 1979. V. 6. P. 577–580.
- Kan J.R., Li H., Wang C., et al. Saturation of polar cap potential: Nonlinearity in quasi-steady solar wind–magnetosphere–ionosphere coupling // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, N A8. P. A08226. DOI: 10.1029/2009JA014389.
- Karavaev Yu.A., Shapovalova A.A., Mishin V.M., Mishin V.V. The superstorm on 20.11.2003: Identification of hidden dependencies of the tail lobe magnetic flux on the solar wind dynamic pressure // *Proc. 9<sup>th</sup> International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October 2012a.* P. 245–250.
- Karavaev Y.A., Shapovalova A.A., Mishin V.M., Mishin V.V. Super-storm 24–25.09.1998: identification of hidden dependencies of the tail lobe magnetic flux on the solar wind dynamic



pressure // Proc. 9<sup>th</sup> International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October. 2012b. P. 251–255.

Kivelson M.G., Ridley A.J. Saturation of the polar cap potential: Inference from Alfvén wing arguments // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. DOI: 10.1029/2007ja012302.

Kovner M.S., Feldstein Ya.I. On solar wind interaction with the Earth’s magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1973. V. 21. P. 1191–1211.

Kuznetsov S.N., Suvorova A.V. Solar wind magnetic field and plasma during magnetopause crossings at geosynchronous orbit // *Adv. Space Res.* 1998. V. 22, N 1. P. 63–66.

Lavraud B., Borovsky J.E. Altered solar wind–magnetosphere interaction at low Mach numbers: Coronal mass ejections // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A00B08. DOI: 10.1029/2008JA013192.

Lopez R.E., Bruntz R., Mitchell E.J., et al. Role of magnetosheath force balance in regulating the dayside reconnection potential // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. A12216. DOI: 10.1029/2009JA014597.

Lyatsky W., Khazanov G.V., Slavin J.A. Saturation of the electric field transmitted to the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, N A8. P. A08221. DOI: 10.1029/2009JA015091.

Maltsev, Yu.P., Lyatsky W.B. Field-aligned currents and erosion of dayside magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1975. V. 23. P. 1257–1261.

Merkin V.G., Goodrich C.C. Does the polar cap area saturate? // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34, N 9. P. L09107.

Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications // *Space Sci. Rev.* 1990. V. 53, N 1. P. 83–163.

Mishin V.M. The Magnetogram Inversion Technique — Applications to the Problem of Magnetospheric Substorms // *Space Sci. Rev.* 1991. V. 57, N 3–4. P. 237–337.

Mishin V.M., Russell C.T., Saifudinova T.I., Bazarzhapov A.D. Study of weak substorms observed during December 8, 1990, Geospace Environment Modeling campaign: Timing of different types of substorm onsets // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A10. P. 23263–23276. DOI: 10.1029/1999ja900495.

Mishin V.M., Förster M., Kurikalova M.A., Mishin V.V. The generator system of field-aligned currents during the April 06, 2000, superstorm // *Adv. Space Res.* 2011. V. 48, N 7. P. 1172–1183.

Mishin V.V., Mishin V.M., Pu Z., et al. Old tail lobes effect on the solar-wind – magnetosphere energy transport for the 27 August 2001 substorm // *Adv. Space Res.* 2014. V. 54, N 12. P. 2540–2548. DOI: 10.1016/j.asr.2014.09.013.

Mishin V.V., Karavaev Y., Han J.P., Wang C. The saturation effect of the Poynting flux into the magnetosphere during superstorms: results of mit and the global PPMLR-MHD model... “Physics of Auroral Phenomena” / Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity. A.G. Yahnin. Apatity, Kola Science Centre RAS. 2015. P. 40–43.

Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Y., et al. Saturation of superstorms and finite compressibility of the magnetosphere: Results of the magnetogram inversion technique and global PPMLR-MHD model // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 13. P. 6734–6741. DOI: 10.1002/2016GL069649.

Perreault P., Akasofu S.I. A study of geomagnetic storms // *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1978. V. 54, N 3. P. 547–573. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1978.tb05494.x.

Pulkkinen T.I., Dimmock A.P., Lakka A., et al. Magnetosheath control of solar wind–magnetosphere coupling efficiency // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. V. 121. P. 8728–8739. DOI: 10.1002/2016JA023011.

Russell C.T., Wang Y.L., Raeder J., et al. The interplanetary shock of September 24, 1998: Arrival at Earth // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N A11. P. 25143–25154. DOI: 10.1029/2000ja900070.

Shue J.H., Chao J.K., Fu H.C., et al. A new functional form to study the control of the magnetopause size and shape // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. P. 9497.

Shue J.H., Song P., Russell C.T., et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N A8. P. 17691–17700.

Siscoe G.L., Crooker N.U., Siebert K.D. Transpolar potential saturation: Roles of region 1 current system and solar wind ram pressure // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N A10. P. 1321.

Suvorova A., Dmitriev A., Chao J.-K., et al. Necessary conditions for geosynchronous magnetopause crossings // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110, A01206. DOI: 10.1029/2003JA010079.

Wilder F.D., Clauer C.R., Baker J., et al. The nonlinear response of the polar cap potential under southward IMF: A statistical view // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, N A12. P. A12229.

URL: <http://gsfc.cdad.gov> (дата обращения 14 апреля марта 2017 г.).

## REFERENCES

Alex S., Mukherjee S., Lakhina G.S. Geomagnetic signatures during the intense geomagnetic storms of 29 October and 20 November 2003. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2006, vol. 68, no. 7. pp. 769–780. DOI: 10.1016/j.jastp.2006.01.003.

Bazarshapov A.D., Mishin V.M., Shpynev G.B. A Mathematical Analysis of Geomagnetic Variation Fields. *Gerlands Beitr. Geophysik.* 1976, vol. 85, no. 1, pp. 76–82.

Borovsky J.E., Lavraud B., Kuznetsova M.M. Polar cap potential saturation, dayside reconnection, and changes to the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A03224. DOI: 10.1029/2009JA014058.

Dmitriev A., Suvorova A., Chao J.-K. A predictive model of geosynchronous magnetopause crossings. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A05208. DOI: 10.1029/2010JA016208.

Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Chao J.-K., Wang C.B., Rastaetter L., Panasyuk M.I., Lazutin L.L., Kovtyukh A.S., Veselovsky I.S., Myagkova I.N. Anomalous dynamics of the extremely compressed magnetosphere during 21 January 2005 magnetic storm. *J. Geophys. Res.* 2014, vol. 119, no. 2, pp. 877–896. DOI: 10.1002/2013JA019534.

Gao Y., Kivelson M.G., Walker R.J. Two models of cross polar cap potential saturation compared: Siscoe-Hill model versus Kivelson-Ridley model. *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2013, vol. 118, no. 2, pp. 794–803.

Huttunen K.E.J., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I., Pulkkinen A., Palmroth M., Reeves G.D., Singer H.J. April 2000 magnetic storm: Solar wind driver and magnetospheric response. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, p. 1440.

Iijima T., Potemra T.A. Large-scale characteristics of field-aligned currents associated with substorms. *J. Geophys. Res.* 1978, vol. 83, no. A2, pp. 599–615.

Kalegav V.V., Makarenkov E.V. Relative importance of ring and tail currents to *Dst* under extremely disturbed conditions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, p. 519.

Kan J., Lee L. Energy coupling function and solar wind magnetosphere dynamo. *Geophys. Res. Lett.* 1979, vol. 6, pp. 577–580.

Kan J.R., Li H., Wang C., Tang B.B., Hu Y.Q. Saturation of polar cap potential: Nonlinearity in quasi-steady solar wind–magnetosphere–ionosphere coupling. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, no. A8, pp. A08226. DOI: 10.1029/2009JA014389.

Karavaev Yu.A., Shapovalova A.A., Mishin V.M., Mishin V.V. The superstorm on 20.11.2003: Identification of hidden dependencies of the tail lobe magnetic flux on the solar wind dynamic pressure. Proc. 9<sup>th</sup> International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October. 2012a, pp. 245–250.

Karavaev Y.A., Shapovalova A.A., Mishin V.M., Mishin V.V. Super-storm 24–25.09.1998: identification of hidden dependencies of the tail lobe magnetic flux on the solar wind dynamic pressure. Proc. 9<sup>th</sup> International Conference “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October 2012b, pp. 251–255.

Kivelson M.G., Ridley A.J. Saturation of the polar cap potential: Inference from Alfvén wing arguments. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, DOI: 10.1029/2007ja012302.

Kovner M.S., Feldstein Ya.I. On solar wind interaction with the Earth's magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1973, vol. 21, pp. 1191–1211.

Kuznetsov S.N., Suvorova A.V. Solar wind magnetic field and plasma during magnetopause crossings at geosynchronous orbit. *Adv. Space Res.* 1998, vol. 22, no. 1, pp. 63–66.

Lavraud B., Borovsky J.E. Altered solar wind-magnetosphere interaction at low Mach numbers: Coronal mass ejections. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A00B08. DOI: 10.1029/2008JA013192.

Lopez R.E., Bruntz R., Mitchell E.J., Wiltberger M., Lyon J.G., Merkin V.G. Role of magnetosheath force balance in regulating the dayside reconnection potential. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, A12216. DOI: 10.1029/2009JA014597.

Lyatsky W., Khazanov G.V., Slavin J.A. Saturation of the electric field transmitted to the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, no. A8, pp. A08221. DOI: 10.1029/2009JA015091.

Maltsev Yu.P., Lyatsky W.B. Field-aligned currents and erosion of dayside magnetosphere. *Planet. Space Sci.* 1975, vol. 23, pp. 1257–1261.

Merkin V.G., Goodrich C.C. Does the polar cap area saturate? *Geophys. Res. Lett.* 2007, vol. 34, no. 9, p. L09107.

Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications. *Space Sci Rev.* 1990, vol. 53, no. 1, pp. 83–163.

Mishin V.M. The Magnetogram Inversion Technique — Applications to the Problem of Magnetospheric Substorms. *Space Sci Rev.* 1991, vol. 57, no. 3–4, pp. 237–337.

Mishin V.M., Russell C.T., Saifudinova T.I., Bazarzhapov A.D. Study of weak substorms observed during December 8, 1990, Geospace Environment Modeling campaign: Timing of different types of substorm onsets. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A10, pp. 23263–23276. DOI: 10.1029/1999ja900495.

Mishin V.M., Förster M., Kurikalova M.A., Mishin V.V. The generator system of field-aligned currents during the April 06, 2000, superstorm. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 48, no. 7, pp. 1172–1183.

Mishin V.V., Mishin V.M., Pu Z., Lunyushkin S.B., Saponova L.A., Sukhbaatar U., Baishev D.G. Old tail lobes effect on the solar wind — magnetosphere energy transport for the 27 August 2001 substorm. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 54, no. 12, pp. 2540–2548. DOI: 10.1016/j.asr.2014.09.013.

Mishin V.V., Karavaev Y., Han J.P., Wang C. The saturation effect of the Poynting flux into the magnetosphere during superstorms: results of mit and the global PPMLR-MHD model... “Physics of Auroral Phenomena”. Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity. A.G. Yahnin. Apatity, Kola Science Centre, Russian Academy of Science. 2015, pp. 40–43.

Mishin V.V., Mishin V.M., Karavaev Y., Han J.P., Wang C. Saturation of superstorms and finite compressibility of the magnetosphere: Results of the magnetogram inversion technique and global PPMLR-MHD model. *Geophys. Res. Lett.* 2016, vol. 43, no. 13, pp. 6734–6741. DOI: 10.1002/2016GL069649.

Perreault P., Akasofu S.I. A study of geomagnetic storms. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* 1978, vol. 54, no. 3, pp. 547–573. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1978.tb05494.x.

Pulkkinen T.I., Dimmock A.P., Lakka A., Osmane A., Kilpua E., Myllys M., Tanskanen E.I., Viljanen A. Magnetosheath control of solar wind-magnetosphere coupling efficiency. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 8728–8739. DOI: 10.1002/2016JA023011.

Russell C.T., Wang Y.L., Raeder J., Tokar R.L., Smith C.W., Ogilvie K.W., Lazarus A.J., Lepping R.P., Szabo A., Kawano H., Mukai T., Savin S., Yermolaev Y.I., Zhou X.-Y., Tsurutani B.T. The interplanetary shock of September 24, 1998: Arrival at Earth. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, no. A11, pp. 25143–25154. DOI: 10.1029/2000ja900070.

Shue J.H., Chao J.K., Fu H.C., Russell C.T., Song P., Khurana K. K., Singer H. A new functional form to study the control of the magnetopause size and shape. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, p. 9497.

Shue J.H., Song P., Russell C.T., Khurana K.K., Russell C.T., Singer H.J., Song P. Magnetopause location under extreme solar wind conditions. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, no. A8, pp. 17691–17700.

Siscoe G.L., Crooker N.U., Siebert K.D. Transpolar potential saturation: Roles of region 1 current system and solar wind ram pressure. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A10, p. 1321.

Suvorova A., Dmitriev A., Chao J.-K., Thomsen M., Yang Y.-H. Necessary conditions for geosynchronous magnetopause crossings. *J. Geophys. Res.* 2005, vol. 110, A01206. DOI: 10.1029/2003JA010079.

Wilder F.D., Clauer C.R., Baker J., Cousins E.P., Hairston M.R. The nonlinear response of the polar cap potential under southward IMF: A statistical view. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, no. A12, p. A12229.

URL: <http://gsfc.cda.gov> (accessed April 14, 2017).

#### Как цитировать эту статью

Мишин В.В., Караваяев Ю.А. Насыщение магнитосферы во время супербури: новые результаты техники инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика.* 2017. Т. 3, № 3. С. 30–39.

#### How to cite this article

Mishin V.V., Karavaev Yu.A. Saturation of the magnetosphere during superstorms: new results from magnetogram inversion technique. *Solar-Terrestrial Physics.* 2017. Vol. 3, iss. 3. P. 30–39.