

**ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ В ДВУХ ПОЛУШАРИЯХ ЗЕМЛИ  
В ХОДЕ МАГНИТОСФЕРНОЙ БУРИ  
ПО ДАННЫМ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ**

**DYNAMICS OF FIELD-ALIGNED CURRENTS IN TWO HEMISPHERES  
DURING A MAGNETOSPHERIC STORM FROM  
MAGNETOGRAM INVERSION TECHNIQUE DATA**

**В.В. Мишин**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, vladm@iszf.irk.ru*

**Ю.А. Караваяев**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, ykar@iszf.irk.ru*

**С.Б. Лунюшкин**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, lunyushkin@iszf.irk.ru*

**Ю.В. Пенских**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, penskikh@iszf.irk.ru*

**В.Э. Капустин**

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, kapustin@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*

**S.B. Lunyushkin**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, lunyushkin@iszf.irk.ru*

**Yu.V. Pensikh**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, penskikh@iszf.irk.ru*

**V.E. Kapustin**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kapustin@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** С помощью модернизированной техники инверсии магнитограмм продолжено изучение физических процессов в ходе магнитосферной бури 17.08.2001 на основе анализа динамики интенсивностей продольных токов (ПТ) в зоне 1 Ииджимы—Потемры в полярных ионосферах двух полушарий Земли. Полученные результаты о динамике асимметрии ПТ двух типов (утро–вечер и межполушарной), как и полученные нами ранее закономерности поведения токов Холла и границ полярных шапок в зависимости от наблюдавшейся в ходе бури большой азимутальной компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) и сезонного хода проводимости, соответствуют открытой модели магнитосферы и результатам спутниковых наблюдений полярных сияний в двух полушариях. Показано, что ослабление асимметрии двух типов в распределении ПТ во время суббури, имевших место в ходе исследуемой бури, происходит практически полностью в зимнем полушарии и значительно слабее — в летнем. Это явление мы связываем с преобладанием эффекта длительного воздействия азимутальной компоненты ММП в освещенной полярной ионосфере летнего полушария над суббуревым эффектом симметризации ночной магнитосферы. Отмечен эффект симметризации полярной шапки и ПТ, создаваемый импульсом давления солнечного ветра в конце бури, предложено качественное объяснение этого эффекта.

**Ключевые слова:** полярная шапка, продольные токи, магнитосферные бури и суббури, азимутальная компонента межпланетного магнитного поля, асимметрии утро–вечер и межполушарная.

**Abstract.** We continue to study the physical processes occurring during the August 17, 2001 magnetospheric storm by analyzing the dynamics of the intensity of field-aligned currents (FACs) in Iijima—Potemra Region 1 in the polar ionospheres of the two hemispheres, using the modernized magnetogram inversion technique. The results obtained on the dynamics of two types of FAC asymmetry (dawn-dusk and interhemispheric), as well as the previously obtained regularities in the behavior of Hall currents and the polar cap boundaries depending on the large azimuthal component of the interplanetary magnetic field (IMF), observed during the storm, and the seasonal behavior of the conductivity are consistent with the open magnetosphere model and with satellite observations of auroras in two hemispheres. We have shown that the weakening of the asymmetry of two types in the FAC distribution during substorms in the storm under study occurs almost completely in the winter hemisphere and is much weaker in the summer one. We associate this phenomenon with the predominance of the effect of long-term exposure to the azimuthal IMF component in the sunlit polar ionosphere of the summer hemisphere over the substorm symmetrization effect of the night magnetosphere. A symmetrization effect of the polar cap and FACs, created by the solar wind pressure pulse at the end of the storm, is observed. We propose a qualitative explanation of this effect.

**Keywords:** polar cap, field-aligned currents, magnetospheric storms and substorms, azimuthal component of the interplanetary magnetic field, dawn–dusk and interhemispheric asymmetries.

## ВВЕДЕНИЕ

Важным направлением в исследовании суббуревых процессов является анализ динамики электрических полей и токов в высокоширотной ионосфере, где во время магнитосферных суббурь и бурь наблюдаются высыпания энергичных электронов и связанные с ними интенсивные полярные сияния и усиления ионосферной проводимости в E-области. Расчет и изучение ионосферных электрических полей и токов являются традиционной задачей техники инверсии магнитограмм (ТИМ). ТИМ по данным мировой сети наземных магнитометров позволяет получать временные ряды крупномасштабных пространственных распределений систем конвекции, ионосферных и продольных токов, магнитного потока через полярную шапку и ряд других параметров, характеризующих магнитосферно-ионосферные процессы в спокойное и возмущенное время [Mishin, 1990]. Из-за малого количества станций в Южном полушарии такой анализ при помощи ТИМ обычно проводился только по данным обсерваторий Северного полушария. Для того чтобы изучить динамику суббури в Южном полушарии, в [Mishin et al., 2011, 2019] была предложена виртуальная модель глобальной электрической цепи системы магнитосфера — ионосферы двух полушарий. В этой модели используются данные двух событий, зарегистрированных только в Северном полушарии, но в разные сезоны года (зимнем и летнем). При этом зимняя (северная) и летняя (южная) ионосферы связаны с внешним генератором в магнитосфере параллельно. Кроме того, между ионосферами предполагается дополнительная связь через частичный кольцевой ток [Mishin et al., 2011]. В результате из-за различия проводимостей в летнем и зимнем полушариях можно предсказать наличие асимметрии в распределении ПТ двух типов одновременно: утро–вечер и межполушарной, что похоже на то, что предполагает открытая модель магнитосферы и наблюдения, но в связи с другим фактором — азимутальной компонентой межпланетного магнитного поля (ММП). Для того чтобы преодолеть трудности виртуальной модели, обусловленные использованием данных только для одного полушария, в [Lunyushkin et al., 2019] нами была исследована динамика горизонтальных ионосферных токов Холла, а также границ полярной шапки (ПШ) одновременно в двух полушариях на основе модернизированного метода ТИМ в приближении однородной проводимости ионосферы. Было показано принципиальное подобие систем конвекции в двух полушариях и превышение интенсивностей токов Холла в летнем полушарии, что авторы объясняли большей волновой (создаваемой солнечными фотонами) проводимостью. Основное внимание в этой работе было уделено динамике ионосферной конвекции и границ ПШ. В частности, показано, что их динамика соответствует открытой модели магнитосферы [Cowley, 1981; Cowley, Lockwood, 1992] в зависимости от наблюдавшейся на длительном интервале магнитосферной бури

17.08.2001 сильной компоненты ММП  $B_y > 20$  нТл. В продолжение нашей публикации [Лунюшкин и др., 2019] в настоящей работе исследуется актуальный для физики магнитосферных суббурь вопрос о динамике интенсивности крупномасштабных продольных токов в двух полушариях в ходе магнитосферной бури 11–24 UT 17.08.2001. Проводится также анализ влияния на динамику ПТ наблюдавшихся в конце бури усиленных динамического давления солнечного ветра и уменьшения величины компонент ММП, что не входило в задачу предыдущей работы.

## ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Описание используемого здесь модернизированного варианта ТИМ, а также поведения параметров солнечного ветра, индексов геомагнитной активности и магнитного потока через ПШ в ходе магнитосферной бури 17.08.2001 было дано в [Лунюшкин и др., 2019]. Поэтому мы приводим графики вариаций указанных параметров для интервала 10:40–24:00 UT (рис. 1) без подробного описания.

Видно, что данная геомагнитная буря характеризуется наличием сильной азимутальной компоненты ММП  $B_y \geq 20$  нТл. Лунюшкин и др., [2019] показали, что эффект  $B_y$  действительно проявляется в зеркальном смещении относительно полуденного меридиана дневных горловин ионосферной конвекции в разных полушариях, теоретически ожидаемом в открытой модели магнитосферы [Cowley, 1981; Cowley, Lockwood, 1992], а также в смещении центра тяжести ПШ в Северном полушарии в направлении с вечера на утро и в обратном направлении — в Южном полушарии. Эти результаты соответствуют данным оптических наблюдений полярных сияний [Østgaard et al., 2018], полученным одновременно на спутниках в двух полушариях на интервале 16:00–19:00 UT. Данные о динамике границ авроральных овалов и ПШ в двух полушариях были получены по картам распределения плотности продольных токов (ПТ), которые позволяют определить границы их зон [Лунюшкин, Пенских, 2019] и следить за суббуревой динамикой. В настоящей работе по значениям плотностей и границ ПТ трех зон Ииджимы—Потемры были рассчитаны полные интенсивности токов внутри каждой зоны для втекающих в ионосферу («+») и вытекающих из нее («-») ПТ. В результате нами были получены временные вариации интенсивностей токов в каждой из трех зон ПТ для обоих полушарий в ходе исследуемой геомагнитной бури 17.08.2001. Ниже мы ограничимся анализом динамики пары ПТ зоны 1 (рис. 2) в обоих полушариях, поскольку именно через пару этих токов магнитосферный генератор запитывает северную и южную полярные ионосферы [Mishin et al., 2011]. Интенсивность ПТ в зоне 1 примерно равна сумме интенсивностей ПТ зон 2 и 0 ( $I_{R1} \approx I_{R2} + I_{R0}$ ) как в утреннем, так и в вечернем секторах ионосферы [Kurikalova et al.,

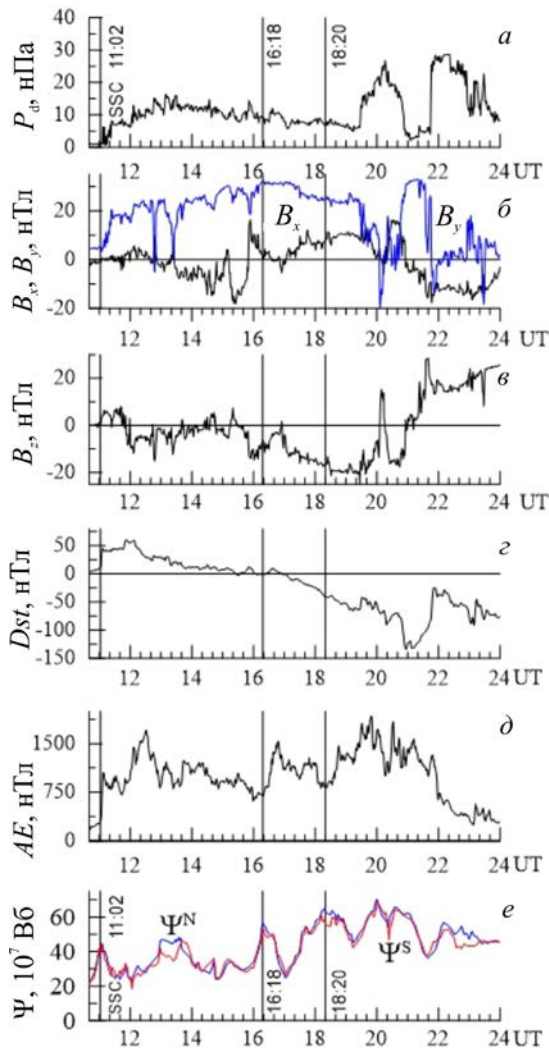


Рис. 1. Вариации в ходе магнитной бури 17.08.2001 давления СВ  $P_d$  (а); компонент ММП  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  (б, в); индексов кольцевого тока (г) и авроральной активности  $AE$  (д); магнитного потока (е) через ПШ Северного ( $\Psi_N$ , синяя линия) и Южного ( $\Psi_S$ , красная линия) полушарий. Вертикальные линии показывают моменты начала взрывной фазы ряда суббурь

2018]. Перейдем к сравнительному анализу динамики ПТ в зоне 1.

### ДИНАМИКА ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ

Из сравнения интенсивностей втекающих ( $I_{RI+}$ ) и вытекающих ( $I_{RI-}$ ) ПТ в зоне 1 (рис. 2) мы видим неравенство  $I_{RI+} > I_{RI-}$ , которое соответствует наблюдаемому в это время расширению ПШ на утреннюю сторону [Луныошкин и др., 2019] в соответствии с предсказаниями открытой модели магнитосферы для Северного полушария. В утреннем секторе отношение интенсивностей ПТ между Северным (N) и Южным (S) полушариями достигает величины  $\geq 2$ , в вечернем же секторе это отношение немного больше 1 за исключением нескольких коротких интервалов между суббуревыми активизациями. Из сравнения вариаций интенсивностей ПТ в утреннем и вечернем секторах (где расположены соответственно втекающие и вытекающие ПТ зоны 1) очевидно следующее: в N-полушарии неравенство/асимметрия утро–

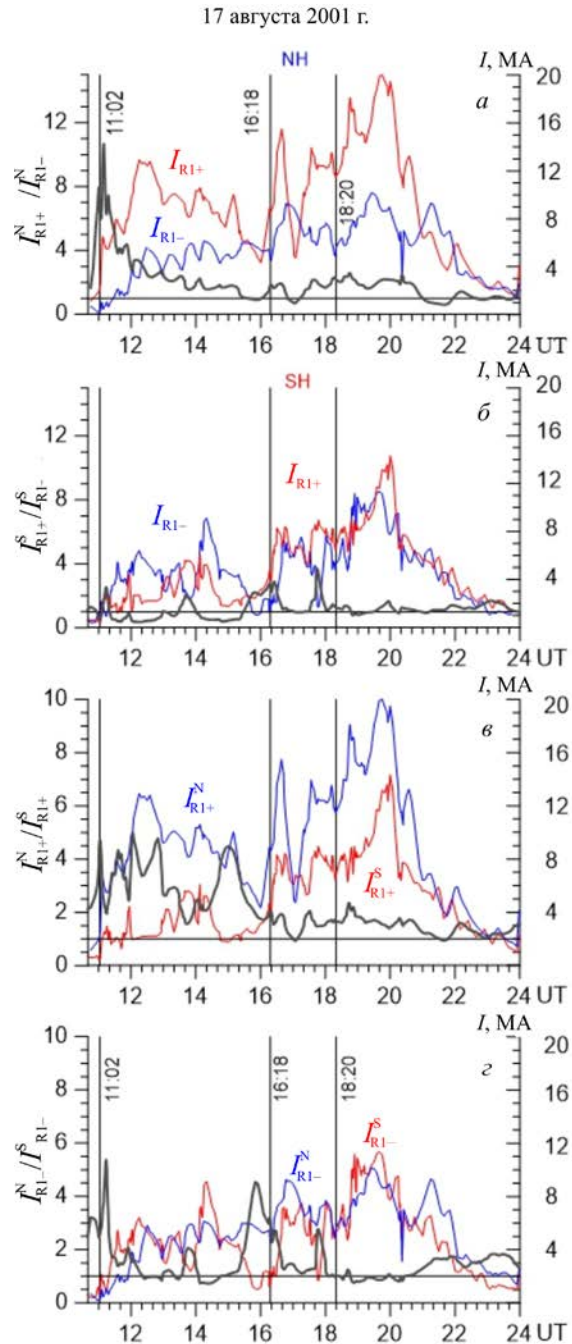


Рис. 2. Изменение интенсивностей ПТ в зоне 1 в ходе бури в двух полушариях: втекающих ( $I_{RI+}$ , утро, красная линия) и вытекающих ( $I_{RI-}$ , вечер, синяя линия) ПТ в Северном (а) и Южном (б) полушариях и их отношения (черная линия); сравнение интенсивностей ПТ (в, г)  $I_{RI+}$  и  $I_{RI-}$  в Северном (синяя кривая) и Южном (красная кривая) полушариях и их отношения (черная линия)

вечер интенсивностей ПТ в зоне 1 существенно больше, чем в S-полушарии (панели а, б, рис. 2). В Южном полушарии знак неравенства в интервале 11:00–15:30 UT меняется на противоположный ( $I_{RI+} < I_{RI-}$ ), что соответствует эффекту компоненты ММП  $B_y \geq +20$  нТл, проявляющемуся в расширении границы ПШ и соответствующем усилении ПТ на вечерней стороне. Наблюдавшиеся затем суббури (с началами взрывной фазы в 16:18 и 18:20 UT) привели к полному и длительному исчезновению асимметрии утро–вечер в S-полушарии и лишь к кратковременному (вблизи 19:00 UT) ослаблению этой асим-

метрии в N-полушарии. Далее сразу после 19 UT наблюдался эффект гидродинамического удара: резкое усиление  $P_d$  с одновременным ослаблением всех компонент ММП вызвали симметричное сжатие дневной магнитосферы и расширение ПШ в обоих полушариях с соответствующим ростом магнитных потоков в них и одновременным быстрым ростом  $AE$ -индексов (рис. 1) и интенсивности ПТ зоны 1 (рис. 2), который был остановлен коротким усилением северного ММП около 20:10 UT. Отмеченный гидродинамический удар не вызвал исчезновения асимметрии ПТ утро-вечер в Северном полушарии, но вызвал ее исчезновение в Южном полушарии.

Существенным следствием этого удара была полная симметризация ПШ, которая выразилась в совпадении их конфигураций в обоих полушариях (рис. 3). Наблюдавшийся после первого импульса  $P_d$  второй импульс (21:30 UT) был даже более сильным, однако не вызвал усиления ПТ и  $AE$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ

Для интерпретации описанной выше динамики межполушарной асимметрии в развитии ПТ приведем дополнительные данные о динамике терминаторов в обоих полушариях и связанных с ними освещенностях полярной шапки и авроральной зоны. Как следует из работы [Лунюшкин и др., 2019], освещенность ПШ была практически полной в Северном полушарии и отсутствовала в Южном. Проверка положения терминатора по данным сайта [<http://supermag.jhuapl.edu>] показала ту же картину, а именно: южная ПШ на протяжении всего интервала 12–20 UT находилась в неосвещенной (теневой)

области, а северная ПШ была полностью в освещенной области (рис. 3). Поэтому зоны 1 и 2 ПТ, окружающие ПШ, были существенно больше освещены в летнем (Северном) полушарии по сравнению с зимним (Южным) полушарием. В связи с этим основной вклад в полную интенсивность ПТ зоны 1 в летнем полушарии вносит дневная часть зоны 1 ПТ, замыкающаяся ионосферными токами Педерсена в области повышенной волновой проводимости. Таким образом, большая волновая проводимость авроральной ионосферы летнего полушария обусловила здесь в целом большие значения интенсивностей ПТ по сравнению с ПТ в зимнем полушарии (как и ионосферных токов Педерсена и Холла [Lunyushkin et al., 2019]). Несмотря на то, что в данной работе ТИМ применена в приближении однородной ионосферной проводимости, описанный результат вполне логичен, поскольку он обусловлен неявным присутствием волновой проводимости в эквивалентных токах, создающих исходное для ТИМ поле наземных геомагнитных вариаций. Описанный эффект волновой проводимости и его объяснение согласуются с результатами [Laundal et al., 2016]. Неоднозначность поведения  $I_{R1+}/I_{R1-}$  в двух полушариях связана с наличием сильной азимутальной компоненты ММП  $B_y$ , которая вызывает усиление ПТ в утреннем секторе зимнего полушария и в вечернем секторе летнего полушария. Поскольку в исследуемом нами событии волновая проводимость в Южном полушарии значительно меньше, чем в Северном, такой значительной асимметрии утро-вечер из-за эффекта ММП  $B_y$  в Южном полушарии на первый взгляд не наблюдается. Однако тщательный анализ показывает наличие асимметрии  $I_{R1+} \leq 0.5 I_{R1-}$  в Южном полушарии на интервале 11:20–15:40 UT (рис. 2, б) за исключением трех коротких интервалов между суббурьевыми возмущениями (около 14, 16 и 18 UT), когда появлялась противоположная асимметрия. Следовательно, можно сказать, что развитие суббури приводит к исчезновению асимметрии утро-вечер (снимает эффект ММП  $B_y$ ) в распределении ПТ в Южном полушарии. То же самое можно сказать о межполушарной асимметрии, т. е. о вариациях  $I_{R1-}^N / I_{R1-}^S$  в вечернем секторе (рис. 2, в). Таким образом, эффект ММП  $B_y$  (усиление ПТ в вечернем секторе) компенсирует ослабление этих токов в Южном полушарии из-за слабой освещенности. В утреннем секторе Северного полушария полной симметризации не происходит, поскольку оба фактора ( $B_y$  и большая освещенность) вместе дают здесь большое усиление ПТ, а симметризация в хвосте магнитосферы во время взрывной фазы суббури проявляется в основном на ночной стороне (рис. 2, в). Кратковременная симметризация в утреннем секторе между ПТ двух полушарий ( $I_{R1+}^N / I_{R1+}^S \rightarrow 1$ ) наблюдается в результате развития сильной взрывной фазы суббури около 17:00 UT.

Отмеченный в конце предыдущего раздела эффект воздействия сильного импульса  $P_d$  наблюдался одновременно с уменьшением азимутальной компоненты ММП и сопровождался повышением геомагнитной активности и всплеском ПТ, а также их

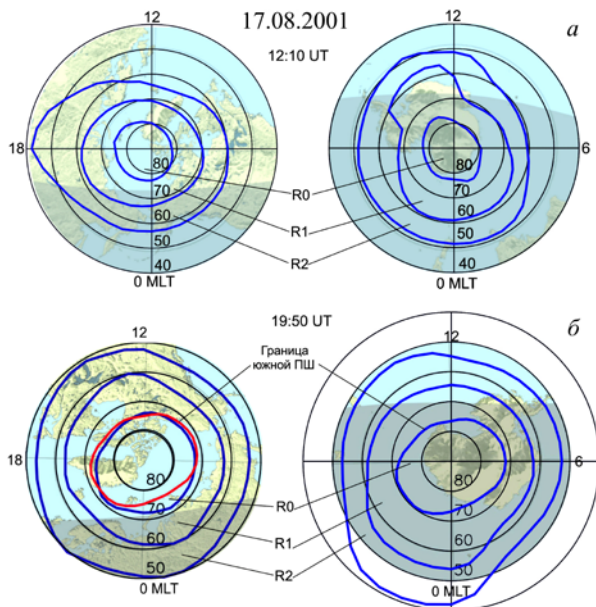


Рис. 3. Положение терминатора (граница тени) и границ зон ПТ (жирные синие линии) в Северном (слева) и Южном (справа) полушариях в моменты 12:10 UT (а) и 19:50 UT (б). Внешний контур синих линий — граница зоны R2 ПТ, средний — граница между зонами R2 и R1 ПТ, в центре — полярная шапка (северная граница зоны R1 ПТ). Координаты: геомагнитная широта — магнитное местное время (MLT)

симметризацией. Дальнейший рост ПТ и развитие взрывной фазы суббури были прерваны резким импульсом ММП на север. Для объяснения этого явления симметризации мы предполагаем следующий сценарий: резкое усиление давления при наличии южной компоненты ММП и минимизация нерадиальных компонент ММП вызывают симметричный гидродинамический удар, который сжимает магнитосферу симметрично как на дневной стороне, так и на фланге магнитосферы. Усиление давления в хвосте вызывает также сжатие нейтрального слоя, пересоединение и начало взрывной фазы суббури. Пересоединение в хвосте уменьшает там асимметрию распределения магнитного и плазменного давления [Østgaard et al., 2018]. В результате мы наблюдаем совпадение конфигураций ПШ двух полушарий (рис. 3, б, слева), а не только равенство их площадей, как это было перед импульсом  $P_d$ . Наблюдавшийся после первого импульса  $P_d$  (19:20 UT) еще более сильный импульс (~22:00 UT) не вызвал усиления геомагнитной активности, а сопровождался затуханием ПТ и геомагнитной активности в целом и окончанием бури. Мы это связываем с преобладанием северного ММП в этот период (см. рис. 1). Если бы осталось преобладание  $B_y$  во время второго импульса, он мог бы еще раз вызвать всплеск активности [Parkhomov et al., 2005].

Перейдем теперь к сравнению полученных нами результатов с виртуальной глобальной моделью. Выводы о том, что величина ПТ в летнем полушарии больше, чем в зимнем, совпадают, поскольку они следуют из закона Ома для электрической цепи с параллельно соединенными нагрузками-ионосферами. Отметим, однако, что в виртуальной глобальной модели электрической цепи магнитосферы и двух ионосфер [Mishin et al., 2011, 2019] рассматриваются интенсивности ПТ в мезомасштабных ячейках на ночной стороне. Поэтому прямое сравнение наших результатов с этой моделью не вполне корректно, поскольку выше мы рассматривали интенсивности в полных зонах ПТ, включая их дневную часть. Следовательно, можно говорить о сравнении в летнем полушарии, в котором наблюдается усиление ПТ в утреннем секторе, что соответствует предсказаниям виртуальной модели. Однако в нашем событии это усиление могло быть вызвано только положительной компонентой ММП  $B_y$ . Поэтому приведенные результаты, хотя и согласуются с выводами этой модели, но не могут их подтвердить. Необходимо рассмотрение событий с противоположно направленным азимутальным полем или при его отсутствии ( $B_y \leq 0$ ), а также проведение анализа динамики интенсивностей в мезомасштабных ячейках ПТ на ночной стороне с учетом отмеченного в [Mishin et al., 2019] вращения системы ПТ в ходе суббури.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показано превышение интенсивностей ПТ зоны 1 в летнем полушарии по сравнению с зимним, что соответствует существенной разнице их освещенностей и соответственно проводимостей в двух полярных ионосферах.

2. Знак неравенства между интенсивностями ПТ в утреннем и вечернем секторах меняется при переходе из Северного полушария в Южное в соответствии с известным эффектом азимутальной компоненты ММП.

3. Развитие суббурь приводит к уменьшению отмеченной асимметрии ПТ утро–вечер, причем в зимнем полушарии эта асимметрия исчезает практически полностью.

4. Слабый эффект симметризации в летнем полушарии мы связываем с сильным эффектом компоненты ММП  $B_y$  в хорошо освещенных дневных секторах зон ПТ, вклад которых в интенсивность ПТ преобладает над вкладом ночных частей этих зон, подверженных эффекту симметризации.

5. Резкий рост геомагнитной активности, интенсивности ПТ и ослабление их асимметрии, а также совпадение конфигураций ПШ двух полушарий вблизи 20:00 UT, по-видимому, являются результатом симметричного сжатия магнитосферы сильным импульсом давления солнечного ветра.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 и при частичной поддержке фондом РФФИ, гранты № 18-05-00437, 19-05-00665. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» [<http://ckp-angara.iszf.irk.ru>].

Организации и сотрудники, которым автор выражает глубокую признательность за возможность использования данных наземных магнитометров: Мировая сеть магнитных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ; Дж. Дж. Лав (Геологическая служба США, USGS); Я. Манн (CARISMA); CANMOS; К. Юмото и К. Шиокава (база данных S-RAMP); база данных SPIDR; О. Трошичев (AARI); М. Энгебретсон (программа MACCS); отдел геомагнетизма Геологической службы Канады; GIMA; MEASURE, UCLA IGPP и Флоридский технологический институт; Е. Зеста (SAMBA); К. Юмото (Chain 210); Ф. Онари (SAMNET); Э. Тансканен (институты, которые поддерживают сеть магнитометров IMAGE); PENGUIN; М. Коннорс (AUTUMN); Р. Бельке (DTU Space); Л.Дж. Ланцаротти и А.Т. Везервак (магнитометр МакМердо); ICESTAR; RAPIDMAG; Британская антарктическая служба; Р. Чи (McMac); С. Макмиллан (BGS); Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова (ИЗМИРАН); Дж. Мацка (GFZ); Б. Хейлиг (MFGI); Дж. Реда (IGFPAS); М. Велланте (Университет Аквилы); В. Лесур и А. Чембодат (BCMT); М. Костелло (данные получены в сотрудничестве с Австралийским агентством по наукам о Земле); Дж.В. Гьерлоев (SuperMAG). Данные, использованные в настоящем исследовании, доступны на сайте SuperMAG [<http://supermag.jhuapl.edu>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лунюшкин С.Б., Пенских Ю.В. Диагностика границ аврорального овала на основе техники инверсии магнитограмм // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5, N 2. Р. 97–113. DOI: 10.12737/szf-52201913.

Лунюшкин С.Б., Мишин В.В., Караваев Ю.А., Пенских Ю.В. Исследование динамики электрических токов и полярных шапок в ионосферах двух полушарий во время

геомагнитной бури 17 августа 2001 г. // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 2. С. 17–29. DOI: [10.12737/szf-52201903](https://doi.org/10.12737/szf-52201903).

Cowley S.W.H. Magnetospheric asymmetries associated with the *y*-component of the IMF // *Planet. Space Sci.* 1981. Vol. 29, no. 1. P. 79–96. DOI: [10.1016/0032-0633\(81\)90141-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90141-0).

Cowley S.W.H., Lockwood M. Excitation and decay of solar-wind driven flows in the magnetosphere—ionosphere system // *Ann. Geophys.* 1992. Vol. 10. P. 103–115.

Kurikalova M.A., Mishin V.M., Mishin V.V., et al. Relative role of the azimuthal Pedersen current component in the substorm global electric circuit // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. Vol. 179. P. 562–568. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.09.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.014).

Laundal K.M., Gjerloev J.W., Østgaard N., et al. The impact of sunlight on high-latitude equivalent currents // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121, no. 3. P. 2715–2726. DOI: [10.1002/2015ja022236](https://doi.org/10.1002/2015ja022236).

Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications // *Space Sci. Rev.* 1990. Vol. 53, no. 1–2. P. 83–163. DOI: [10.1007/bf00217429](https://doi.org/10.1007/bf00217429).

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. P. 1172–1183. DOI: [10.1016/j.asr.2011.05.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.05.029).

Mishin V.M., Mishin V.V., Kurikalova M.A., et al. Positive and negative feedbacks in the magnetosphere-ionosphere coupling // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019. Vol. 187. P. 10–21. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.002).

Parkhomov V.A., Riazantseva M.O., Zastenker G.N. Local amplification of auroral electrojet as a response to a sharp solar wind pressure pulse // *Planet. Space Sci.* 2005. Vol. 53, no. 1. P. 265–274. DOI: [10.1016/j.pss.2004.09.052](https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.052).

Østgaard N., Reistad J.P., Tenfjord P., et al. The asymmetric geospace as displayed during the geomagnetic storm on August 17, 2001 // *Ann. Geophys.* 2018. Vol. 36, no. 6. P. 1577–1596. DOI: [10.5194/angeo-36-1577-2018](https://doi.org/10.5194/angeo-36-1577-2018).

URL: <http://supermag.jhuapl.edu> (дата обращения 18 ноября 2020 г.).

URL: <https://ckp-angara.iszf.irk.ru> (дата обращения 18 ноября 2020 г.).

## REFERENCES

Cowley S.W.H. Magnetospheric asymmetries associated with the *y*-component of the IMF. *Planet. Space Sci.* 1981, vol. 29, no. 1, pp. 79–96. DOI: [10.1016/0032-0633\(81\)90141-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90141-0).

Cowley S.W.H., Lockwood M. Excitation and decay of solar-wind driven flows in the magnetosphere-ionosphere system. *Ann. Geophys.* 1992, vol. 10, pp. 103–115.

Kurikalova M.A., Mishin V.M., Mishin V.V., Lunyushkin S.B., Penskiikh Y.V. Relative role of the azimuthal Pedersen current component in the substorm global electric circuit. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 179, pp. 562–568. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.09.014](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.09.014).

Laundal K.M., Gjerloev J.W., Østgaard N., Reistad J.P., Haaland S., Snekvik K., Tenfjord P., Ohtani S., Milan S.E. The impact of sunlight on high-latitude equivalent currents. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, no. 3, pp. 2715–2726. DOI: [10.1002/2015ja022236](https://doi.org/10.1002/2015ja022236).

Lunyushkin S.B., Mishin V.V., Karavaev Y.A., Penskiikh Y.V., Kapustin V.E. Studying the dynamics of electric currents and polar caps in ionospheres of two hemispheres during the August 17, 2001 geomagnetic storm. *Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 5, no. 2, pp. 15–27. DOI: [10.12737/stp-52201903](https://doi.org/10.12737/stp-52201903).

Lunyushkin S.B., Penskiikh Y.V. Diagnostics of the auroral oval boundaries on the basis of the magnetogram inversion technique. *Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 5, no. 2, pp. 88–100. DOI: [10.12737/stp-52201913](https://doi.org/10.12737/stp-52201913).

Mishin V.M. The magnetogram inversion technique and some applications. *Space Sci. Rev.* 1990, vol. 53, no. 1–2, pp. 83–163. DOI: [10.1007/bf00217429](https://doi.org/10.1007/bf00217429).

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. DOI: [10.1016/j.asr.2011.05.029](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.05.029).

Mishin V.M., Mishin V.V., Kurikalova M.A., Sapronova L.A., Karavaev Y.A. Positive and negative feedbacks in the magnetosphere-ionosphere coupling. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 187, pp. 10–21. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.03.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.002).

Parkhomov V.A., Riazantseva M.O., Zastenker G.N. Local amplification of auroral electrojet as a response to a sharp solar wind pressure pulse. *Planet. Space Sci.* 2005, vol. 53, no. 1, pp. 265–274. DOI: [10.1016/j.pss.2004.09.052](https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.09.052).

Østgaard N., Reistad J.P., Tenfjord P., et al. The asymmetric geospace as displayed during the geomagnetic storm on August 17, 2001 // *Ann. Geophys.* 2018, vol. 36, no. 6, pp. 1577–1596. DOI: [10.5194/angeo-36-1577-2018](https://doi.org/10.5194/angeo-36-1577-2018).

URL: <http://supermag.jhuapl.edu> (accessed November 18, 2020).

URL: <https://ckp-angara.iszf.irk.ru> (accessed November 18, 2020).

### Как цитировать эту статью:

Мишин В.В., Караваяев Ю.А., Лунюшкин С.Б., Пенских Ю.В., Капустин В.Э. Динамика продольных токов в двух полушариях Земли в ходе магнитосферной бури по данным техники инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика.* 2021. Т. 7, № 1. С. 34–39. DOI: [10.12737/szf-71202104](https://doi.org/10.12737/szf-71202104).