

УДК 550.338.1

ДИНАМИКА ГРАНИЦЫ ИЗОТРОПИЗАЦИИ ПРИ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

© 2022 г. В. Г. Воробьев¹ *, О. И. Ягодкина¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия

*E-mail: vorobjev@pgia.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

Данные низкоорбитальных спутников DMSP использованы для исследования динамики ионного давления и широты границы изотропизации при значительных, но разных по своему характеру изменениях динамического давления солнечного ветра. Для двух событий показаны высокие коэффициенты корреляции между давлением ионов на границы изотропизации и ее широтой. Обсуждаются возможные причины такой динамики параметров границы изотропизации.

DOI: 10.31857/S0367676522030255

ВВЕДЕНИЕ

Граница изотропизации (ГИ) определяет в экваториальной плоскости магнитосферы область, в которой при удалении от Земли гирорадиус захваченных энергичных частиц становится сопоставим с радиусом кривизны силовой линии. Из-за питч-углового рассеяния в токовом слое здесь и на больших расстояниях регистрируются изотропные потоки частиц. В области изотропной плазмы ее свойства остаются постоянными вдоль геомагнитной силовой линии, что и определяет возможность определения ГИ по наблюдениям потоков изотропных частиц на высотах ионосферы. В [1] предложена методика определения положения ГИ, именуемой в этой работе как граница b2i по наблюдениям высыпающихся авроральных частиц на низкоорбитальных спутниках серии DMSP. Тесная статистическая связь ($r = 0.92$) между ГИ для протонов с энергией 30 кэВ и границей b2i показана в работе [2].

Широта ГИ характеризует угол наклона или степень вытянутости силовых линий в хвосте магнитосферы, которые, в свою очередь, определяются величиной поперечного тока, текущего в экваториальной плоскости с утренней стороны на вечернюю [3]. К важным параметрам магнитосферы относятся и давление плазмы, определяющее распределение продольных токов и устойчивость распределенной конфигурации. Усредненное распределение давления плазмы в окружающем Землю плазменном кольце на геоцентрических расстояниях от ~ 6 до $\sim 10 R_e$ получено в [4] по дан-

ным спутников проекта THEMIS. В [5] наблюдения спутника GEOTAIL на расстояниях от 10 до $50 R_e$ в ночной магнитосфере использованы для создания 2D модели распределения давления плазмы. Результаты этого исследования указывают на значительный рост давления плазмы в экваториальной плоскости магнитосферы с увеличением динамического давления солнечного ветра (P_{sw}). По данным спутников DMSP при низком уровне магнитной активности давление ионов на изотропной границе b2i в зависимости от P_{sw} исследовалось в [6], где обнаружена фактически линейная связь этих параметров.

Цитируемые выше результаты были получены путем обработки больших массивов данных и указывают на среднюю, статистическую взаимосвязь между исследуемыми параметрами. Статистически значимые наборы данных в этих исследованиях представлены, главным образом, в интервале P_{sw} от 1.0 до 5.0 нПа.

Изучение временной динамики ГИ и определение ее характеристик (широта, давление ионов) при более значительных изменениях величины динамического давления солнечного ветра возможны только в результате анализа отдельных событий. Для этих целей в настоящей работе отобраны два интервала длительностью более 8 ч каждый со значительными, но разными по своему характеру изменениями P_{sw} . Оба интервала относятся к начальной фазе магнитных бурь, характеризующейся положительными значениями индекса

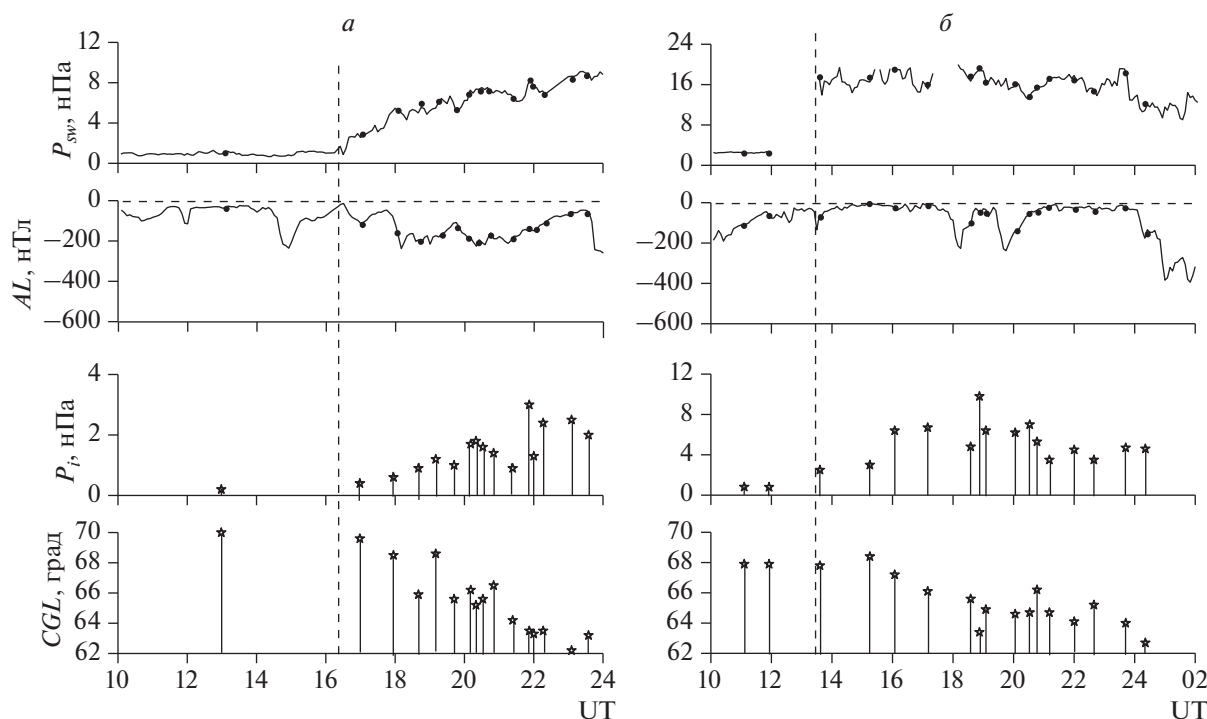


Рис. 1. Наблюдения границы изотропизации (ГИ) низкоорбитальными спутниками серии DMSP: 31 мая 2013 г. (а) и 18 марта 2002 г. (б). Сверху вниз показано: динамическое давление солнечного ветра (P_{sw}), AL индекс магнитной активности, давление ионов на ГИ (P_i) и ее широта (CGL). Вертикальной штриховой линией отмечено начало роста P_{sw} .

SYM/H. Главная фаза магнитных бурь протекала вне рассматриваемых интервалов. Чтобы избежать значительного влияния суббуревых процессов на результаты исследования, важным критерием при отборе интервалов являлся низкий уровень магнитной активности в авроральной зоне, $AL > -200$ нТл.

Давление ионов на границе изотропизации (b2i) и ее широта определялись по данным спутников DMSP, регистрирующих характеристики выпадающих частиц с временным разрешением в 1 с. Для каждого пролета спутников через зону авроральных высыпаний были получены широтные профили плотности потока энергии выпадающих ионов (J_i) с энергиями от 3 до 30 кэВ и широтные профили ионного давления. Методика определения ионного давления по измерениям спутников DMSP опубликована в [7]. Давление ионов рассчитывается в предположении максвелловского распределения частиц по энергиям. В настоящей работе использован модифицированный вариант этой методики, предложенный в [8].

Потоки энергии ионов и их средние энергии постепенно увеличиваются с уменьшением широты, достигая максимума на экваториальном крае авроральных высыпаний. В соответствии с [1], положение максимума J_i определялось в качестве границы

изотропизации. Экваториальнее ГИ поток энергии ионов быстро падает. Таким образом, ГИ может располагаться в области максимума ионного давления, а ее широта будет определять наиболее экваториальную область ионосферы, ионное давление в которой можно проецировать в экваториальную магнитосферу.

АНАЛИЗ СОБЫТИЙ

Исследуемые интервалы 31 мая 2013 г. и 18 марта 2002 г. представлены на рис. 1а и 1б соответственно. Сверху вниз на рисунках показано: динамическое давление солнечного ветра (P_{sw}) и AL индекс магнитной активности, взятые на портале OMNIWeb; ниже звездочками показано давление ионов на границе изотропизации (P_i), а на самой нижней панели рисунка ее исправленная геомагнитная широта (CGL). Моменты регистрации ГИ спутниками DMSP обозначены точками на двух верхних панелях рисунка и отрезками вертикальных линий на двух нижних панелях. В работе использованы данные в секторе 18:30–21:30 MLT, в котором находилось максимальное число спутниковых пересечений. Среднее местное магнитное время регистрации ГИ составило $\langle MLT \rangle = 20.0 \pm 0.7$.

Увеличению P_{sw} и в том, и в другом событиях предшествовали магнитоспокойные периоды дли-

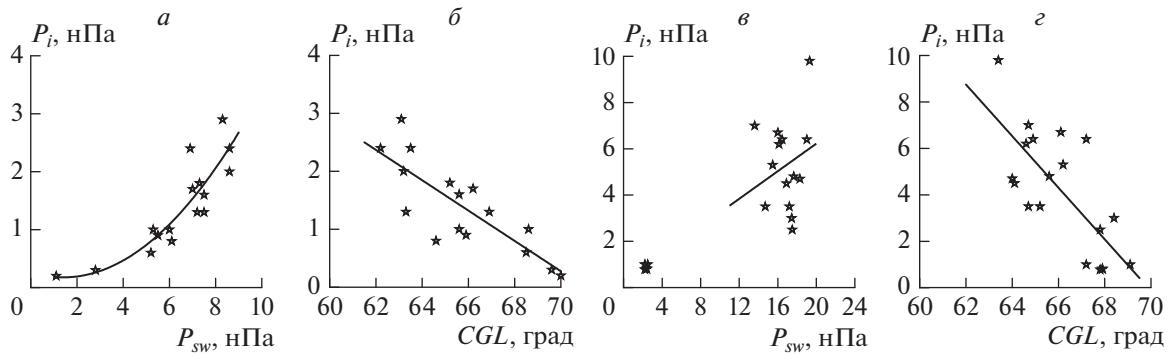


Рис. 2. Зависимость ионного давления на ГИ от динамического давления солнечного ветра (а) и взаимосвязь ионного давления на ГИ с ее широтой (б) для события 31 мая 2013 г.; то же для события 18 марта 2002 г. (в) и (з) соответственно.

тельностью более 24 ч при низком уровне P_{sw} . В событии 31 мая 2013 г. (рис. 1а) после небольшого скачка динамического давления солнечного ветра, зарегистрированного в 16:18 UT, следовал интервал относительно плавного, постепенного роста P_{sw} от ~2.5 нПа до ~8.5 нПа к 24:00 UT. Как видно на рис. 1а, рост динамического давления солнечного ветра сопровождался примерно пропорциональным увеличением ионного давления на ГИ и ее смещением в более низкие широты.

Связь между ионным давлением на границе изотропизации (P_i) и динамическим давлением солнечного ветра (P_{sw}) иллюстрирует рис. 2а. Распределение экспериментальных точек на графике наилучшим образом описывается уравнением регрессии 2-ой степени с коэффициентом корреляции $r = 0.86$. Взаимосвязь между давлением ионов на границе изотропизации и ее широтой показана на рис. 2б. Сплошная линия соответствует уравнению линейной регрессии с $r = 0.82$. Высокий коэффициент корреляции указывает на тесную связь между давлением ионов на ГИ и ее широтой. Разброс данных на рис. 2а и 2б может быть обусловлен как некоторым различием по MLT спутниковых траекторий, так и незначительной, но существующей в рассматриваемый период времени магнитной активностью в авроральной зоне.

В событии 18 марта 2002 г. (рис. 1б) наблюдался резкий скачок динамического давления солнечного ветра, зарегистрированный как SSC в 13:22 UT, после которого P_{sw} изменялось незначительно в течение ~10 ч, варьируясь около ~16 нПа. Ближайшая после SSC регистрация ГИ была произведена спутником F18 в 13:39 UT через ~17 мин после SSC. При скорости солнечного ветра ~470 км/с ударная волна за это время должна была переместиться на расстоянии ~75 Re от подсолнечной точки в антисолнечном направлении, указывая на то, что к моменту пролета F18 возмущение в солнечном ветре охватывало уже значительную часть хвоста магнитосферы.

По наблюдениям на спутнике Wind, данные которого регистрировались непрерывно, средние 5 мин значения P_{sw} выросли в ~7 раз от 2.4 нПа непосредственно перед SSC до 17.5 нПа после скачка давления. В ионосфере спутник F18 показывает трехкратное увеличение давления ионов от 0.8 нПа в спокойный период по наблюдениям в ~11:55 UT до 2.5 нПа в 13:39 UT. При этом широтное положение ГИ в этих пролетах изменилось менее чем на 0.3° , а широтное положение экваториальной и приполюсной границ ионных высыпаний осталось неизменным.

Последующие наблюдения указывают на постепенный рост величины ионного давления до максимума в ~10 нПа около 18:52 UT. Рост ионного давления на ГИ продолжался ~5.5 ч, после чего наблюдалось уменьшение давления до ~4 нПа к ~24 UT. Все эти изменения были зарегистрированы при слабо меняющемся динамическом давлении солнечного ветра, что указывает на отсутствие в этом событии корреляционной взаимосвязи между давлением ионов на границе изотропизации (P_i) и динамическим давлением солнечного ветра. Давление на ГИ относительно P_{sw} иллюстрирует рис. 2в: коэффициент линейной корреляции между исследуемыми параметрами $r = 0.13$. В то же время даже визуально на рис. 1б можно обнаружить тесную связь между давлением ионов на ГИ и положением этой границы по широте: увеличение P_i сопровождается уменьшением широты границы и наоборот. Взаимосвязь между двумя этими характеристиками ГИ иллюстрирует рис. 2з. Сплошная линия на рисунке соответствует уравнению линейной регрессии с коэффициентом корреляции $r = 0.68$. Данные по пролету спутника F13 в 00:28 UT 19 марта 2002 г. показаны на рис. 1б, но в работе не рассматривались, так как в этот период началось значительное магнитосферное возмущение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По данным спутников серии DMSP исследованы динамика и параметры (давление ионов и широта) границы изотропизации при значительных, но разных по своему характеру изменениях динамического давления солнечного ветра 31 мая 2013 г. (событие 1) и 18 марта 2002 г. (событие 2). В событии 1 в течение длительного интервала относительно плавного, постепенного роста P_{sw} зарегистрирован примерно пропорциональный рост ионного давления на ГИ и смещение границы в более низкие широты. В событии 2 при высоком, но слабо изменяющемся уровне P_{sw} обнаружен постепенный рост величины ионного давления на ГИ с максимумом через ~ 5.5 ч после скачка P_{sw} . Показан высокий уровень корреляции между давлением ионов на ГИ и ее широтой. При уровнях динамического давления солнечного ветра $P_{sw} \sim 16\text{--}20$ нПа давление ионов на ГИ может достигать $6\text{--}8$ нПа и даже ~ 10 нПа.

В событии 1 рост ионного давления, очевидно, связан с ростом P_{sw} . Как и в работе [5], мы полагаем, что уровень ионного давления, по-видимому, контролируется и поддерживается быстрыми магнитозвуковыми волнами, которые быстро распространяют информацию об изменении состояния солнечного ветра внутрь магнитосферы и создают ее сбалансированную конфигурацию.

Более детально обсудим событие 2. В этом событии после длительного магнитоспокойного периода наблюдался значительный, резкий скачок P_{sw} , за которым следовал интервал ~ 10 ч, в течение которого динамическое давление солнечного ветра изменялось незначительно. Скачок P_{sw} , зарегистрированный как SSC, приводит к сжатию магнитосферы, которая при этом сохраняет свою топологию. На это указывает рост ионного давления на границе изотропизации, широтное положение которой при этом не меняется.

Рост динамического давления обычно происходит в течение 3–5 мин, поэтому для большинства захваченных магнитосферных частиц первый адиабатический инвариант будет сохраняться. Увеличение величины магнитного поля в экваториальной области магнитосферы в результате скачка динамического давления солнечного ветра приведет к уменьшению ларморовских радиусов частиц, но одновременно и к уменьшению масштаба неоднородности магнитного поля. В результате не изменится или почти не изменится положение в пространстве границы изотропизации и проекция этой границы на ионосферу, но происходит рост давления на ГИ, как это и показано на рис. 1б.

В дальнейшем, при достаточно стабильном и высоком уровне P_{sw} в событии 2 наблюдался постепенный рост ионного давления на ГИ и уменьшение ее широты. Этот процесс продолжался в те-

чение ~ 5.5 ч. По временной шкале динамика параметров ГИ хорошо согласуется с результатами работы [9]. По наблюдениям спутника GEOTAIL в этой работе было показано, что при северной ориентации ММП плотность и давление ионов в плазменном слое увеличивается с ростом кинетической энергии и плотности плазмы солнечного ветра. При этом наибольший коэффициент корреляции этих параметров достигается, если рассматривать параметры солнечного ветра, усредненные за ~ 6 ч до регистрации характеристик плазменного слоя. Предполагается, что в спокойные периоды при отсутствии значительной суббуравной активности удастся зарегистрировать медленный диффузионный переход плазмы из солнечного ветра в плазменный слой через фланги магнитосферы. При квазистационарных условиях в плазме солнечного ветра, наблюдаемых в событии 2, это может означать постепенный рост давления в плазменном слое. В условиях магнитоэстатического равновесия наличие градиента давления приведет к росту поперечного тока в магнитосфере, уменьшению угла наклона силовых линий к экваториальной плоскости и, как следствие, приближению к Земле, как границы изотропизации, так и границы стабильного захвата.

Можно предположить, что по мере такого движения происходит постепенное увеличение интенсивности кольцевого тока и рост напряженности магнитного поля и его вертикальной компоненты на внешней стороне относительно центра DR тока. Таким образом, эффект кольцевого тока работает в обратном направлении относительно описанного выше сценария. В начальный период это противодействие не существенно, но становится все более значительным по мере движения ГИ к Земле и приближения плотности плазмы в плазменном слое магнитосферы к насыщению, характерному для данного уровня плотности солнечного ветра. В пользу такого предположения свидетельствует начало уменьшения положительных значений индекса SYM/H после ~ 17 UT (рисунок не приводится).

Когда эффект кольцевого тока начинает доминировать, появляются экстремумы в характеристиках ГИ: уменьшается ионное давление и несколько увеличивается ее широта. Такие же экстремумы, но менее четко выраженные из-за маскирующего влияния непрерывно увеличивающегося динамического давления солнечного ветра, отмечены и в событии 1 около 22 UT.

Рост P_{sw} осуществляется, главным образом, за счет увеличения плотности плазмы солнечного ветра. При этом, как было показано в [10], во всех секторах ночного аврорального овала увеличиваются потоки высыпавшихся частиц, как ионов, так и электронов, но, хотя и меньшей степени, уменьшается их средняя энергия. Это должно при-

вести к уменьшению интенсивности аврорального свечения в ультрафиолетовой области спектра и в основных авроральных эмиссиях 391.4, 427.8 и 557.7 нм, но к увеличению интенсивности красного свечения в эмиссии 630.0 нм. Ранее в [11] было обнаружено, что большие интенсивности красного свечения ($\geq 5 kR$) наблюдаются в ночных сияниях при больших уровнях плотности солнечного ветра ($N_{sw} > 10 \text{ см}^{-3}$), полученных усреднением за 3–9 ч до часа регистрации интенсивности сияний. Длительность интервалов усреднения определялась условиями стабильности знак Bz компоненты ММП. Рост интенсивности эмиссии 630.0 нм с увеличением N_{sw} был зарегистрирован как при положительной, так и при отрицательной полярности ММП.

Данные спутников DMSP взяты на страницах <http://sd-www.jhuapl.edu>; параметры ММП, плазмы солнечного ветра и индексы магнитной активности взяты на страницах <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/> и <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Newell P.T., Feldstein Ya.I., Galperin Y.I. et al.* // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. No. A5. Art. No. 10737.
2. *Newell P.T., Sergeev V.A., Bikkuzina G.R., Wing S.* // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. No. A3. P. 4739.
3. *Sergeev V.A., Malkov M.V., Mursula K.* // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. No. A5. P. 7609.
4. *Курпичев И.П., Антонова Е.Е.* // Геомагн. и аэроном. 2011. Т. 51. № 4. С. 45; *Kirpichev I.P., Antonova E.E.* // Geomagn. Aeron. 2011. V. 51. № 4. P. 450.
5. *Tsyganenko N.A., Mukai T.* // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. No. A3. P. 1136.
6. *Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Антонова Е.Е.* // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. 59. № 5. С. 582; *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Antonova E.E.* // Geomagn. Aeron. 2019. V. 59. No. 5. P. 543.
7. *Wing S., Newell P.T.* // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. No. A4. P. 6785.
8. *Stepanova M., Antonova E.E., Bosqued J.-M.* // Adv. Space Res. 2006. V. 38. No. 8. P. 1631.
9. *Terasawa, T. Fujimoto M., Mukai T. et al.* // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. No. 8. P. 935.
10. *Vorobjev V.G., Rezhnev B.V., Yagodkina O.I.* // Ann. Geophys. 2004. V. 22. No. 3. P. 1047.
11. *Хвиюзова Т.А., Леонтьев С.В.* // Геомагн. и аэроном. 2002. Т. 42. № 4. С. 519; *Khviuzova T.A., Leontyev S.V.* // Geomagn. Aeron. 2002. V. 42. No. 4. P. 492.

Dynamics of the isotropy boundary under significant changes in the solar wind dynamic pressure

V. G. Vorobjev^{a,*}, O. I. Yagodkina^a

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia

*e-mail: vorobjev@pgia.ru

Observations from the low-orbit DMSP spacecraft are used to study the dynamics of the ion pressure and the latitude of the isotropic boundary (IB) under significant but different changes in the solar wind dynamic pressure. For two events, high correlation coefficients were shown between the ion pressure on the IB and its latitude. Possible reasons for such dynamics of IB parameters are discussed.