

УДК 533.95

ВАРИАЦИИ ДАВЛЕНИЯ ИОННЫХ КОМПОНЕНТ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ВО ВРЕМЯ ДИПОЛИЗАЦИЙ В БЛИЖНЕМ ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

© 2020 г. А. Ю. Малыхин^{1, *}, Е. Е. Григоренко^{1, **}, Е. А. Кронберг^{2, 3}, П. Дали²

¹Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), г. Москва, Россия

²Институт Макса Планка по исследованию Солнечной системы, г. Геттинген, Германия

³Мюнхенский университет им. Людвиг Максимилиана, г. Мюнхен, Германия

*e-mail: anmaurdreg@gmail.com

**e-mail: elenagrigorenko2003@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.03.2019 г.

После доработки 11.06.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

В работе выполнен анализ динамики потоков тепловых и сверхтепловых ионов H^+ и O^+ и вариаций давления этих компонент во время 11 событий диполизации магнитного поля в плазменном слое геомагнитного хвоста по спутниковым наблюдениям Cluster. Установлено, что во всех событиях величина энергии ионов H^+ и O^+ , соответствующая максимальной величине потока, приближалась к верхнему энергетическому порогу масс-спектрометров тепловой плазмы CODIF (~40 кэВ) или превышала его. В такие периоды, значения плотности, температуры и давления, определенные в диапазоне энергий до 40 кэВ, являются заниженными по сравнению с реальными значениями. Для определения давления в такие интервалы мы использовали измерения потоков ионных компонент в диапазоне энергий до 1.3 МэВ, полученные на основе совместного анализа наблюдений CODIF и энерго-масс спектрометров RAPID. В результате установлено, что во время диполизаций давление ионов с учетом высокоэнергичной компоненты спектра может в несколько раз превышать давление, определенное в диапазоне до 40 кэВ. Используя метод наложения эпох, мы показали, что наибольшая ошибка связанная с недооценкой давления ионных компонент H^+ и O^+ наблюдается на фазе роста диполизации. Наиболее существенная недооценка наблюдается для давления ионов O^+ .

DOI: 10.31857/S0016794020010095

1. ВВЕДЕНИЕ

Процесс диполизации магнитного поля играет важную роль в динамике геомагнитного хвоста. Это явление заключается в изменении конфигурации силовых линий из вытянутых в более дипольные, что проявляется в быстром возрастании северной компоненты магнитного поля (B_z). Диполизации можно разделить на два класса: 1) изолированные диполизационные фронты (ДФ), движущиеся к Земле вместе с быстрыми плазменными потоками [Angelopoulos et al., 1992; Nakamura et al., 2002; Runov et al., 2009] и 2) так называемые “вторичные” диполизации наблюдаемые в ближнем плазменном слое хвоста в результате накопления магнитного потока из-за прихода и торможения быстрых плазменных потоков с множественными ДФ [Nakamura et al., 2009].

Спутниковые наблюдения показали, что ДФ имеют толщину порядка гирорадиуса тепловых протонов и представляют собой границы раздела

между горячей и разреженной плазмой быстрого потока и окружающей плазмой плазменного слоя (ПС) [Runov et al., 2011]. Статистические исследования плазменных характеристик, наблюдаемых в изолированных ДФ, показали, что примерно в 54% случаев тепловое давление ионов уменьшается внутри ДФ за счет малой плотности плазмы. Время наблюдения отдельных ДФ составляет от одной до нескольких минут [Schmid et al., 2011].

Вторичные диполизации, напротив, представляют собой более сложные и продолжительные возмущения магнитного поля с многомасштабной пространственной структурой. Эти возмущения часто связаны с суббуревой активностью [Baumjohann et al., 1996; Sergeev et al., 2012; Grigorenko et al., 2018].

Кроме того, что ДФ играют значительную роль в переносе горячей плазмы из удаленных областей хвоста к Земле, на этих структурах возможно также ускорение локальной плазменной популя-

ции [Luo et al., 2014]. В работах [Artemyev et al., 2012; Ukhorskiy et al., 2013; Greco et al., 2014, 2015; Zhukova et al., 2018] обсуждалось эффективное ускорение легких (H^+) и тяжелых (O^+) ионов за счет неадиабатического взаимодействия с движущимся изолированным ДФ. Ускорение ионов ПС за счет отражения от движущегося ДФ обсуждалось также в работе [Zhou et al., 2010]. В работе [Fu et al., 2011] было показано, что на ДФ возможно существенное ускорение электронов за счет бетатронного и Ферми-механизмов. Электромагнитные и электростатические флуктуации, наблюдаемые во время диполизаций, могут внести дополнительный вклад в нагрев электронной компоненты ПС [Grigorenko et al., 2016]. Аналогичные механизмы ускорения и нагрева плазменных компонент имеют место и во вторичных диполизациях, которые носят более продолжительный характер и имеют более сложную многомасштабную магнитную структуру, чем изолированные ДФ [Григоренко и др., 2017; Малыхин и др., 2018; Delcourt et al., 1994; Nosé et al., 2000; Malykhin et al., 2018].

Естественно ожидать, что вышеперечисленные процессы приводят к изменению функций распределения и спектров плазменных компонент ПС, в частности, способствуют возрастанию потоков сверхтепловых частиц и появлению степенных энергичных “хвостов” в диапазоне сверхтепловых энергий (>40 кэВ). В работе [Grigorenko et al., 2016] обсуждалась проблема корректного определения температуры протонов в горячем ПС во время “вторичных” диполизаций. Было показано, что в такие периоды, энергия, соответствующая максимальному потоку протонов, приближается к 30–40 кэВ, что соответствует верхнему энергетическому порогу большинства плазменных спектрометров (в частности спектрометров эксперимента CIS (CODIF и HIA) на спутниках Cluster). В такие периоды вычисление температуры и других моментов функции распределения в диапазоне энергий до 40 кэВ дают заниженные значения. К сожалению, во многих работах, ставивших своей целью оценить относительные концентрации легких и тяжелых ионов и вклада этих компонент в тепловое давление плазмы в ПС во время суббурь, основывалось на вычислениях плазменных моментов только по данным спектрометров CIS/CODIF, т.е. в диапазоне энергий до 40 кэВ [Kistler et al., 2005, 2006].

В данной работе мы представили анализ динамики потоков тепловых (до 40 кэВ) и сверхтепловых (~ 45 кэВ–1.3 МэВ) ионов H^+ и O^+ и вариаций их давлений, наблюдаемых спутниками Cluster в 11 диполизациях в ПС ближнего хвоста магнитосферы Земли ($X \leq -19 R_E$). Мы показали, что во время диполизаций вычисление давления ионных компонент в низко-энергичном диапазоне

(до 40 кэВ) дает значения существенно ниже, величины давления, определенного в диапазоне энергий до ~ 1.3 МэВ согласно методике, описанной в работе [Kronberg et al., 2013]. Особенно значительная ошибка наблюдается при вычислении давления тяжелых ионов (O^+).

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В работе использованы наблюдения магнитного поля со спутников Cluster, полученные феррозондовыми магнитометрами *FluxGate Magnetometer* (FGM), с высоким временным разрешением (22.4 Гц) [Balogh et al., 2011], установленных на спутниках. Измерения потоков энергичных ионов H^+ и O^+ были получены энерго-масс спектрометрами *Research with Adaptive Particle Imaging Detectors* (RAPID) в диапазоне энергий ~ 40 –1500 кэВ для протонов и ~ 80 –4000 кэВ для ионов O^+ [Wilken et al., 2001]. В низкоэнергичном диапазоне (~ 0 –40 кэВ/заряд) измерения потоков ионов H^+ и O^+ были получены ионными масс-спектрометрами *COmposition DIstribution Function* (CODIF) на борту спутников Cluster-1,3,4 [Réme et al., 2001]. В данной работе используется Солнечно-магнитосферная система координат (GSM).

3. НАБЛЮДЕНИЕ ПОТОКОВ И ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ИОНОВ H^+ И O^+ ВО ВРЕМЯ ДИПОЛИЗАЦИЙ

В данном разделе мы рассмотрим пример наблюдения диполизации магнитного поля в ближнем хвосте спутниками Cluster 24.09.2003 г. в 15:20–17:39 UT. В это время спутники Cluster находились в ПС хвоста и имели координаты [$-16.4, 4.2, 2.4$] R_E . На рис. 1 показаны: энерго-временные (E – T) спектрограммы протонов и ионов O^+ (a, θ), измеренные спектрометром CODIF на спутнике Cluster-4 в диапазоне энергий до 40 кэВ; временные профили потоков энергичных протонов (~ 45 –250 кэВ) и ионов O^+ (330–1160 кэВ) (δ, ζ); временные профили теплового давления ионов H^+ и O^+ , рассчитанного по наблюдениям CODIF в диапазоне энергий до 40 кэВ (показаны серыми линиями на панелях δ, ϵ), временные профили давления, рассчитанного с учетом энергичной компоненты спектра с использованием наблюдений RAPID (показаны черными линиями на панелях δ, ϵ); временной профиль B_z -компоненты магнитного поля (η).

Магнитная диполизация проявляется в росте положительной величины B_z -компоненты магнитного поля. На рисунке 1 видно, что небольшая диполизация с амплитудой $\Delta B_z \sim 9$ нТл и длительностью ~ 11 мин наблюдалась примерно в 15:38–15:49 UT (интервал “I” затенен серым цветом). За несколько минут до ее начала RAPID зарегистри-

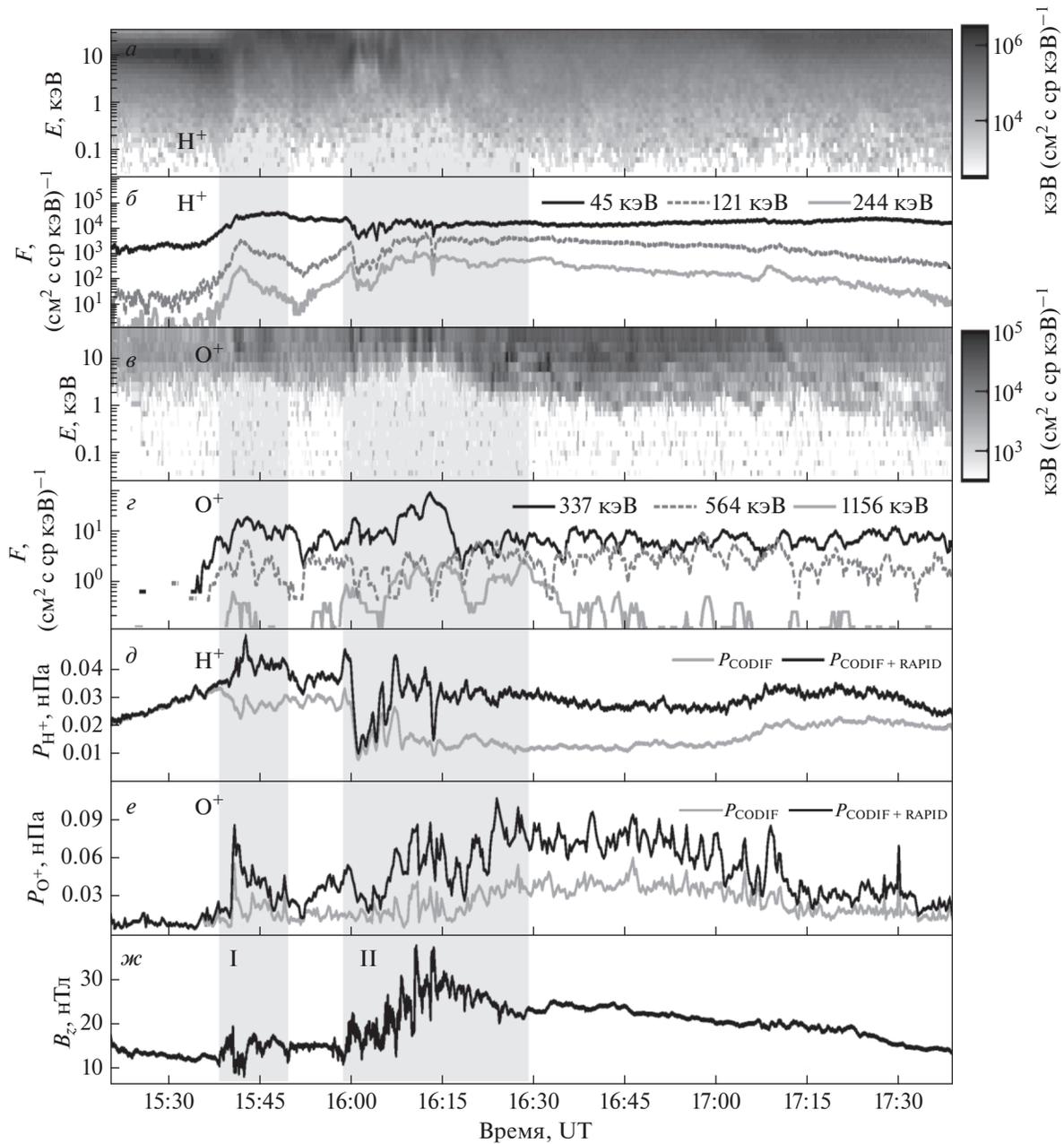


Рис. 1. Пример наблюдения двух диполизаций (затенены серым) магнитного поля в ближнем хвосте спутниками Cluster 24.09.2003 г. Сверху вниз показано: энерго-временные (E - T) спектрограммы протонов и ионов O^+ (a, e), измеренные спектрометром CODIF на спутнике Cluster-4 в диапазоне энергий до 40 кэВ; временные профили потоков энергичных протонов (~45–250 кэВ) и ионов O^+ (330–1160 кэВ) (b, z); временные профили теплового давления ионов H^+ и O^+ , рассчитанного по наблюдениям CODIF в диапазоне энергий до 40 кэВ (показаны серыми линиями на панелях d, e), временные профили давления, рассчитанного с учетом энергичной компоненты спектра с использованием наблюдений RAPID (показаны черными линиями на панелях d, e); временной профиль B_z -компоненты магнитного поля ($ж$).

ровал начало возрастания потоков энергичных ионов H^+ и O^+ . На E - T спектрограмме протонов, наблюдаемой CODIF, в это время наблюдалось возрастание энергии соответствующей максимуму потока $E_{\max_{H^+}}$ вплоть до верхнего энергетического порога детектора (~40 кэВ, рис. 1а). Также

наблюдалось усиление потока тяжелых ионов (O^+) вблизи верхнего энергетического порога CODIF (рис. 1e).

Данные наблюдения свидетельствуют о том, что энергия некоторой части ионной популяции превысила верхний порог детектора CODIF и эта

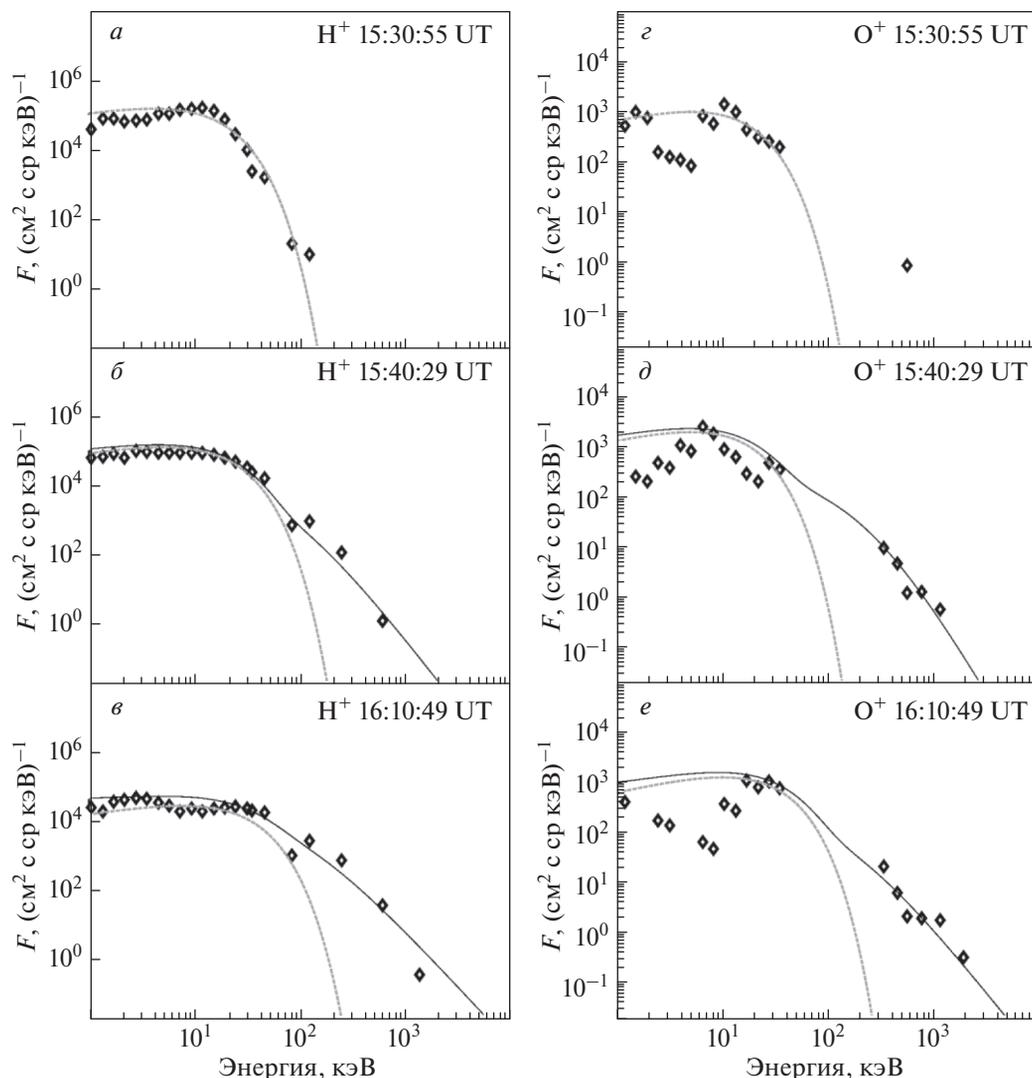


Рис. 2. Энергетические спектры потоков (F) ионов H^+ и O^+ наблюдаемые до начала диполизаций ($a, з$), и во время наблюдения диполизации “I” ($б, д$) и “II” ($в, е$). Моменты измерения спектров указаны на соответствующих панелях. Серой пунктирной линией показана аппроксимация спектра функцией распределения Максвелла по энергиям. Черной линией сплошной показана аппроксимация спектра с помощью комбинации Максвелловского и каппа – распределения (см. объяснения в тексте).

часть популяции перестала наблюдаться данным спектрометром. Действительно, если сравнить энергетические спектры ионов H^+ и O^+ , наблюдаемые до (в 15:30:55 UT, рис. 2а, 2з) и во время диполизации “I” (в 15:40:29 UT, рис. 2б, 2д), то видно, что во время диполизации в энергетических распределениях обеих ионных компонент появляются “степенные” хвосты в диапазоне энергий >40 кэВ. Так, до диполизации энергетические распределения потоков обеих ионных компонент можно описать максвелловской функцией:

$$J_M(E) = J_1 \left(\frac{2\pi}{\sqrt{(\pi E_0)^3}} \right) \sqrt{E} \exp\left(-\frac{E - E_0}{E_0}\right).$$

Параметры для энергетических распределений потоков ионов H^+ и O^+ соответственно: $J_{1_H^+} = 10^6$, $J_{1_O^+} = 10^4$, $E_{0_H^+} = 8$ кэВ и $E_{0_O^+} = 10$ кэВ.

После начала диполизации, из-за появления степенного высокоэнергичного “хвоста” в распределении, для аппроксимации спектра $J_D(E)$ в диапазоне энергий до 1.3 МэВ использовалась сумма максвелловского ($J_M(E)$) и каппа-распределения:

$$J_D(E) = J_M(E) + J_2 \left(1 + \frac{E}{\kappa E_{0\kappa}} \right)^{-(\kappa-1)}.$$

Параметры для низкоэнергичной (максвелловской части) для H^+ и O^+ были следующими: $J_{2_H^+} = 10^{4.5}$, $J_{2_O^+} = 10^{2.6}$, $E_{0к_H^+} = 20$ кэВ и $E_{0_O^+} = 75$ кэВ; $\kappa_{H^+} = 3.0$ и $\kappa_{O^+} \sim 2.7$.

Так как для вычисления теплового давления ионных компонент необходимо учитывать всю популяцию, то в такие периоды давление, определяемое только по наблюдениям CODIF, может быть существенно заниженным. Используя методику описанную в работах [Kronberg et al., 2013; Kronberg et al., 2017], мы вычислили тепловое давление ионов H^+ и O^+ с использованием данных CODIF и RAPID (рис. 1*д*, 1*е*). До начала диполизации “I” величина давления по CODIF (показана серой линией) совпадала с величиной давления, вычисленной по данным CODIF и RAPID (показана чёрной линией). Однако, за несколько минут до начала диполизации начинает наблюдаться расхождение в величинах этих давлений, которое достигает максимальных значений во время диполизации. А именно, во время диполизации давление ионов H^+ , вычисленное с учетом энергичной популяции ($P_{CODIF+RAPID}$), почти в 3 раза превысило давление, вычисленное без учета энергичной популяции (P_{CODIF}). Аналогичный результат был получен в работе [Kronberg et al., 2017] при анализе вклада в полное давление плазмы в ПС хвоста энергичной ионной популяции во время магнитной бури. Для кислорода наблюдалось расхождение в давлениях $P_{CODIF+RAPID}/P_{CODIF} \sim 8$.

Следующая значительная по амплитуде ($\Delta B_Z \sim 26$ нТл) и продолжительная по времени (~ 31 мин) диполизация произошла в $\sim 15:58$ – $16:29$ UT (на рис. 1 этот интервал отмечен как “II”). Данная диполизация является так называемой “вторичной диполизацией” [Nakamura et al., 2009] и для нее характерна сложная форма временного профиля B_Z . А именно, на фоне медленного ($15:58$ – $16:12$ UT) роста B_Z в течение почти 15 мин наблюдались резкие импульсы положительной B_Z – компоненты длительностью ≤ 2 мин. В работе [Malykhin et al., 2018a] было показано, что с такими импульсами B_Z связаны возрастания потоков протонов с энергиями до 600 кэВ.

В данном событии также наблюдаются возрастания потоков протонов и тяжелых ионов O^+ в диапазоне энергий до ~ 1.3 МэВ, и связанные с ними появления “степенных хвостов” в высокоэнергичной части спектра (рис. 2*в*, 2*е*). Параметры распределений указывают на увеличение температуры тепловой популяции и увеличение популяции энергичных ионов по сравнению с предыдущей диполизацией. Так, для протонов $E_{0_H^+} = 15$ кэВ $E_{0к_H^+} = 35$ кэВ и $\kappa_{H^+} \sim 2.3$. Для

ионов O^+ : $E_{0_O^+} = 20$ кэВ, $E_{0к_O^+} = 75$ кэВ и $\kappa_{O^+} \sim 1.6$.

Усиление потоков энергичных ионов способствовало увеличению их вклада в давление и расхождению в величинах давления рассчитанных по приборам CODIF и CODIF совместно с RAPID. Так, для ионов H^+ максимальное расхождение составило: $P_{CODIF+RAPID}/P_{CODIF} \sim 5$, а для ионов O^+ : $P_{CODIF+RAPID}/P_{CODIF} \sim 7$. Важно отметить, что высокоэнергичные ионные популяции H^+ и O^+ сохраняются в ПС в течение продолжительного времени после достижения максимальной величины B_Z (рис. 1), что сказывается на продолжительном расхождении в давлениях рассчитанных без учета и с учетом энергичной популяции.

4. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВАРИАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ИОНОВ H^+ И O^+ ВО ВРЕМЯ ДИПОЛИЗАЦИЙ

Как было показано в предыдущем разделе на примере двух диполизаций, наблюдаемых спутником Cluster-4 24.09.2003 г. в $15:20$ – $17:39$ UT, возрастания потоков энергичных ионов H^+ и O^+ начинаются за несколько минут до начала роста B_Z – компоненты магнитного поля и наблюдаются в течение продолжительного времени после достижения максимальной величины B_Z . С возрастаниями потоков возрастает вклад в давление энергичной популяции ионов.

В результате, во время диполизаций наблюдается существенное расхождение в величинах давления ионов H^+ и O^+ рассчитанных без учета энергичной популяции (в диапазоне энергий до 40 кэВ по данным CODIF) и с учетом энергичной популяции (в диапазоне энергий до 1.3 МэВ по совместным наблюдениям CODIF и RAPID). Для проверки этих выводов мы использовали 11 диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте наблюдаемые спутниками Cluster на расстояниях от Земли $X \leq -19 R_E$. Временные интервалы этих диполизаций и координаты спутникового квартета Cluster представлены в табл. 1.

На рисунке 3 показаны медианные профили (черные сплошные линии), а также верхние и нижние квартили (серые пунктирные линии) отношений давления ионов H^+ (а) и O^+ (б), вычисленных с учетом энергичной популяции ($P_{CODIF+RAPID}$) к давлению, вычисленному без учета энергичной популяции (P_{CODIF}), полученные методом наложения эпох, примененному к 11 событиям магнитной диполизации из таблицы. На рис. 3*в* показан медианный профиль, а также верхние и нижние квартили для величины B_Z – компоненты магнитного поля полученные методом наложения эпох. За начало отсчета време-

Таблица 1. Список интервалов наблюдения диполизаций и координат спутников Cluster

N	Дата	Время, UT	Координаты, R_E
1	08.08.2001 г.	00:28–01:35 UT	–17.5; –8.4; 0.5
2	15.09.2001 г.	00:31–01:00 UT	–19.1; 3.2; 1.5
3	01.10.2001 г.	13:43–13:56 UT	–17.1; 7.8; 2.7
4	01.10.2001 г.	13:57–14:20 UT	–17.1; 7.9; 2.5
5	25.07.2003 г.	06:35–08:01 UT	–15.0; –11.3; –3.8
6	29.07.2003 г.	18:33–19:04 UT	–14.8; –11.2; 0.0
7	01.08.2003 г.	00:03–01:40 UT	–13.9; –10.7; 2.0
8	01.08.2003 г.	05:34–06:19 UT	–15.8; –10.4; –1.3
9	01.08.2003 г.	06:21–07:10 UT	–15.9; –10.3; –1.7
10	24.09.2003 г.	15:22–17:05 UT	–16.4; 4.2; 2.4
11	13.10.2004 г.	05:42–08:21 UT	–13.6; 7.6; 3.3

ни выбраны моменты начала диполизации в каждом событии согласно методике описанной в работе Grigorenko et al. [2016].

Из рисунка видно, что расхождение давлений вычисленных с учетом и без учета энергич-

ной ионной популяции (возрастание величины $P_{\text{CODIF}} + \text{RAPID}/P_{\text{CODIF}}$) начинает наблюдаться за несколько минут до начала диполизаций. Для обеих ионных компонент величина $P_{\text{CODIF}} + \text{RAPID}/P_{\text{CODIF}}$ достигает максимального значения (~ 2.5 для ионов H^+ и ~ 5 для ионов O^+) к концу фазы роста диполизации. Причем, возрастание величины $P_{\text{CODIF}} + \text{RAPID}/P_{\text{CODIF}}$ для тяжелых ионов происходит быстрее, чем для легких ионов. После того, как величина B_z -компоненты магнитного поля достигла максимального уровня, величина $P_{\text{CODIF}} + \text{RAPID}/P_{\text{CODIF}}$ вычисленная для ионов H^+ остается практически постоянной (~ 2) в течение довольно долгого времени (десятки минут). Для ионов O^+ эта величина также остается довольно большой в течение десятков минут после окончания фазы роста диполизации, однако, испытывает значительные вариации, связанные с вариациями потоков энергичных ионов O^+ , наблюдаемых RAPID.

Таким образом, статистический анализ подтвердил, что во время диполизаций вычисление давления ионных компонент в низко-энергичном диапазоне (до 40 кэВ) дает заниженные зна-

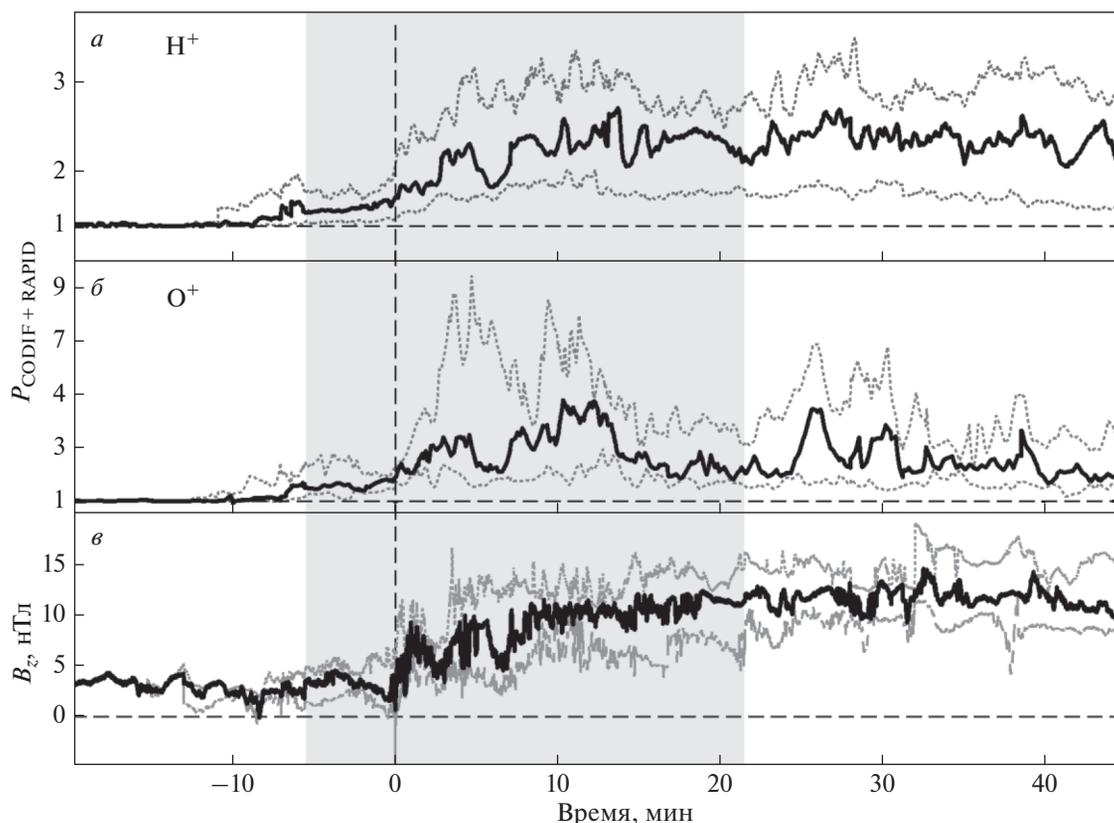


Рис. 3. Временные профили медианного (показаны черной линией) и верхнего и нижнего квартилей (показаны серым пунктиром) полученные с помощью метода наложения эпох для отношения давлений $P_{\text{CODIF}} + \text{RAPID}$ и P_{CODIF} для протонов (а) и ионов O^+ (б), а также для B_z -компоненты магнитного поля (в) наблюдаемых в 11 диполизациях (см. табл. 1). Начало отсчета времени отмечено вертикальной пунктирной линией.

чения по сравнению с величиной давления, вычисленного в диапазоне энергий до ~ 1.3 МэВ. Это связано с тем, что в результате сильного нагрева плазменной популяции энергии ионов, соответствующие максимумам потоков приближаются к верхнему энергетическому порогу спектрометров CODIF и значительная часть популяции становится не измеряемой. Этот эффект наиболее выражен для тяжелых ионов, что приводит к значительной недооценке вклада популяции ионов O^+ в тепловое давление ионов в ПС при его вычисление в диапазоне энергий до 40 кэВ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнен анализ динамики потоков тепловых (до 40 кэВ) и сверхтепловых (~ 45 кэВ–1.3 МэВ) ионов H^+ и O^+ и вариаций давления этих ионных компонент, наблюдаемых спутниками Cluster в 11 диполизациях в ПС ближнего хвоста магнитосферы Земли ($X \leq -19 R_E$). Установлено, что:

во время диполизаций величина энергии ионов H^+ и O^+ , соответствующая максимальной величине потока, приближалась либо превышала верхний энергетический порог масс-спектрометров тепловой плазмы CODIF (~ 40 кэВ), что приводит к недооценке теплового давления данных ионных популяций;

расхождение ионных давлений, вычисленных без учета высокоэнергичной популяции (до 40 кэВ) и с ее учетом (в диапазоне энергий до ~ 1.3 МэВ), начинает наблюдаться за несколько минут до начала диполизации и достигает максимума к концу фазы роста диполизации;

наиболее значительная ошибка, связанная с недооценкой давления, наблюдается для тяжелых ионов: медианная величина отношения $P_{\text{CODIF} + \text{RAPID}}/P_{\text{CODIF}}$ к концу фазы роста диполизации достигает ~ 5 ;

для ионов H^+ ошибка, связанная с недооценкой давления меньше, чем для тяжелых ионов: медианная величина отношения $P_{\text{CODIF} + \text{RAPID}}/P_{\text{CODIF}}$ к концу фазы роста диполизации достигает ~ 2.5 ;

расхождение давлений, вычисленных с учетом и без учета энергичных популяций ионов H^+ и O^+ остается значительным (~ 2) в течение десятков минут после окончания фазы роста диполизации.

Таким образом, во время диполизаций в ближнем хвосте ПС для адекватной оценки вклада ионных компонент в тепловое давление плазмы необходимо учитывать давление не только тепловой, но и сверхтепловой популяции. Не учет последней может привести к значительным недооценкам теплового давления, особенно для тяжелых ионов O^+ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григоренко Е.Е., Кронберг Е.А., Дали П. Нагрев и ускорение заряженных частиц во время магнитных диполизаций // Космич. исслед. Т. 55. № 1. С. 59–68. 2017.
<https://doi.org/10.7868/S002342061701006X>
- Мальных А.Ю., Григоренко Е.Е., Кронберг Е.А., Дали П.В. Влияние бетатронного механизма на динамику потоков сверхтепловых электронов во время диполизаций в геомагнитном хвосте // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 6. С. 1–9. 2018.
<https://doi.org/10.1134/S0016794018060093>
- Angelopoulos V., Baumjohann W., Kennel C.F., Coroniti F.V., Kivelson M.G., Pellat R., Walker R.J., Lühr H., Paschmann G. Bursty bulk flows in the inner central plasma sheet // J. Geophys. Res. V. 97(A4). P. 4027. 1992.
<https://doi.org/10.1029/91JA02701>
- Artemye A.V., Lutsenko V.N., Petrukovich A.A. Ion resonance acceleration by dipolarization fronts: Analytic theory and spacecraft observation // Ann. Geophys. V. 30. P. 316. 2012.
<https://doi.org/10.5194/angeo-30-317>
- Balogh A., Carr C.M., Acuñaet M.H. et al. The Cluster magnetic field investigation: Overview of in-flight performance and initial results // Ann. Geophys. V. 19. P. 1207. 2001.
<https://doi.org/10.5194/angeo-19-1207-2001>
- Baumjohann W., Kamide Y., Nakamura R. Substorms, storms, and the near-Earth tail // J. Geomagn. Geoelectr. V. 48. P. 177. 1996.
<https://doi.org/10.5636/jgg.48.177>
- Delcourt D.C., Sauvaud J.A. Plasma sheet ion energization during dipolarization events // J. Geophys. Res. V. 99. P. 97. 1994.
<https://doi.org/10.1029/93JA01895>
- Fu H.S., Khotyaintsev Y.V., André M., Vaivads A. Fermi and betatron acceleration of suprathermal electrons behind dipolarization fronts // Geophys. Res. Lett. V. 38. № L16104. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011GL048528>
- Greco A., Artemyev A., Zimbardo G. Proton acceleration at two-dimensional dipolarization fronts in the magnetotail // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 119. P. 8929. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020421>
- Greco A., Artemyev A., Zimbardo G. Heavy ion acceleration at dipolarization fronts in planetary magnetotails // Geophys. Res. Lett. V. 42. P. 8280. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066167>
- Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Daly P.W., Ganushkina N. Yu., Lavraud B., Sauvaud J.-A., Zelenyi L.M. Origin of low proton-to-electron temperature ratio in the Earth's plasma sheet // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 121. P. 9985. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2016JA022874>
- Grigorenko E.E., Dubyagin S., Malykhin A. Yu., Khotyaintsev Yu.V., Kronberg E.A., Lavraud B., Ganushkina N. Yu. Intense current structures observed at electron kinetic scales in the near-Earth magnetotail during dipolarization and substorm current wedge formation // Geophys. Res. Lett. V. 45. P. 602. 2018.
<https://doi.org/10.1002/2017GL076303>

- Kistler L.M., Mouikis C., Möbius E. et al. Contribution of nonadiabatic ions to the cross-tail current in an O⁺ dominated thin current sheet // *J. Geophys. Res.* V. 110. № A06213. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010653>
- Kistler L.M., Mouikis C.G., Cao X. et al. Ion composition and pressure changes in storm time and nonstorm substorms in the vicinity of the near-Earth neutral line // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A11222. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2006JA011939>
- Kronberg E.A., Daly P.W. Spectral analysis for wide energy channels // *Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss.* V. 3(2). P. 533–546. 2013.
<https://doi.org/10.5194/gid-3-533-2013>
- Kronberg E.A., Welling D., Kistler L.M., Mouikis C., Daly P.W., Grigorenko E.E., Klecker B., Dandouras I. Contribution of energetic and heavy ions to the plasma pressure: The 27 September to 3 October 2002 storm // *J. Geophys. Res. Space Physics.* V. 122. P. 9427. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024215>
- Luo H., Kronberg E.A., Grigorenko E.E., Fränz M., Daly P.W., Chen G.X., Du A.M., Kistler L.M., Wei Y. Evidence of strong energetic ion acceleration in the near-Earth magnetotail // *Geophys. Res. Lett.* V. 41. P. 3724. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014GL060252>
- Malykhin A.Yu., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Koleva R., Ganushkina N.Yu., Kozak L., Daly P.W. Contrasting dynamics of electrons and protons in the near-Earth plasma sheet during dipolarizations // *Ann. Geophys.* V. 36. P. 741. 2018.
<https://doi.org/10.5194/angeo-36-741-2018>
- Nakamura R., Baumjohann W., Klecker B. et al. Motion of the dipolarization front during a flow burst event observed by Cluster // *Geophys. Res. Lett.* V. 29(20). P. 1942. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2002GL015763>
- Nakamura R., Retinò A., Baumjohann W. et al. Evolution of dipolarization in the near-Earth current sheet induced by Earthward rapid flux transport // *Ann. Geophys.* V. 27. P. 1743. 2009. doi.org/
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-1743-2009>
- Nosé M., Lui A.T.Y., Ohtani S., Mauk B.H., McEntire R.W., Williams D.J., Mukai T., Yumoto K. Acceleration of oxygen ions of ionospheric origin in the near-Earth magnetotail during substorms // *J. Geophys. Res.* V. 105. P. 7669. 2000.
<https://doi.org/10.1029/1999JA000318>
- Réme H., Aoustin C., Bosqued J.M. et al. First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment // *Ann. Geophys.* V. 19. P. 1303. 2001.
- Runov A., Angelopoulos V., Sitnov M.I., Sergeev V.A., Bonnell J., McFadden J.P., Larson D., Glassmeier K.-H., Auster U. THEMIS observations of an earthward-propagating dipolarization front // *Geophys. Res. Lett.* V. 36. № L14106. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2009GL038980>
- Runov A., Angelopoulos V., Zhou X.-Z., Zhang X.-J., Li S., Plaschke F., Bonnell J. A THEMIS multicasestudy of dipolarization fronts in the magnetotail plasma sheet // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A05216. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2010JA016316>
- Sergeev V.A., Angelopoulos V., Nakamura R. Recent advances in understanding substorm dynamics // *Geophys. Res. Lett.* V. 39. № L05101. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2012GL050859>
- Schmid D., Volwerk M., Nakamura R., Baumjohann W., Heyn M. A statistical and event study of magnetotail dipolarization fronts // *Ann. Geophys.* V. 29. P. 1537. 2011.
<https://doi.org/10.5194/angeo-29-1537-2011>
- Ukhorskiy A.Y., Sitnov M.I., Merkin V.G., Artemyev A.V. Rapid acceleration of protons upstream of earthward propagating dipolarization fronts // *J. Geophys. Res.-Space Phys.* V. 118. P. 4952. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50452>
- Wilken B., Daly P.W., Mall U. et al. First results from the RAPID imaging energetic particle spectrometer on board Cluster // *Ann. Geophys.* V. 19. P. 1355. 2001.
<https://doi.org/10.5194/angeo-19-1355-2001>
- Zhou X., Angelopoulos V., Sergeev V.A., Runov A. Accelerated ions ahead of earthward propagating dipolarization fronts // *J. Geophys. Res.* V. 115. № A00103. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015481>
- Zhukova E.I., Malova H.V., Grigorenko E.E., Popov V.Yu., Petrukovich A.A., Delcourt D.C., Kronberg E.A., Daly P.W., Zelenyi L.M. Model of plasma acceleration on multiscale temporal variations of electric and magnetic fields during substorm dipolarizations in the Earth's magnetotail // *Ann. Geophys.-Italy.* V. 61. 3. № GM334. 2018.
<https://doi.org/10.4401/ag-7582>