

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 59, номер 6, 2021

---

---

**Все статьи были рекомендованы для публикации в рамках  
16-й конференции “Физика плазмы в Солнечной системе”**

Вариации протонов и дважды ионизированных ионов гелия в солнечном ветре <i>А. А. Хохлачев, М. О. Рязанцева, Л. С. Рахманова, Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина</i>	443
Экспериментальный спектр вариаций космических лучей в широком диапазоне жесткостей по данным AMS-02 <i>В. Г. Янке, А. В. Белов, Н. С. Шлык, П. Г. Кобелев, Л. А. Трефилова</i>	454
Динамика радиационной обстановки в околоземном пространстве в сентябре–ноябре 2020 по данным спутников <i>МЕТЕОР-М</i> и <i>ЭЛЕКТРО-Л</i> <i>И. Н. Мягкова, А. В. Богомолов, В. Е. Еремеев, А. О. Ширяев, Е. А. Гинзбург</i>	460
Пространственно-временная структура высыпаний энергичных электронов по данным баллонных наблюдений и измерений полярных спутников 1–6. II. 2015 <i>А. Д. Кугушева, В. В. Калегаев, Н. А. Власова, К. А. Петров, Г. А. Базилевская, В. С. Махмутов</i>	473
О возможных причинах положительного возмущения глобального электронного содержания в период сложного гелио-геофизического события в сентябре 2017 года <i>М. В. Клименко, В. В. Клименко, Ф. С. Бессараб, А. В. Тимченко, И. А. Миронова, Е. В. Розанов</i>	483
Пространственная структура поляризованного джета по данным спутников <i>NORSAT-1</i> и <i>SWARM</i> <i>А. А. Синевич, А. А. Чернышов, Д. В. Чугунин, В. Я. Милох, М. М. Могилевский</i>	489
Долгоживущие метеорные следы, сформированные при радиальном расширении крупных метеороидов <i>А. В. Михалев</i>	498
Особенности магнитосферы Марса по данным спутников <i>МАРС-3</i> и <i>ФОБОС-2</i> : сопоставление с результатами <i>MGS</i> и <i>MAVEN</i> <i>Т. К. Бреус, М. И. Веригин, Г. А. Котова, Дж. А. Славин</i>	504
Наблюдение неустойчивости плазмы между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса <i>К. И. Ким, С. Д. Шувалов</i>	519
Авторский указатель за 2021 г.	527

---

---

С 8 по 12 февраля 2021 г. в ИКИ РАН проводилась очередная, шестнадцатая конференция “Физика плазмы в солнечной системе”. Тематика конференции связана с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов в космической плазме, в частности, процессов на Солнце, в солнечном ветре, в ионосфере и магнитосфере Земли и других планет солнечной системы. В данный выпуск вошли статьи, написанные по докладам с конференции.

## ВАРИАЦИИ ПРОТОНОВ И ДВАЖДЫ ИОНИЗИРОВАННЫХ ИОНОВ ГЕЛИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

© 2021 г. А. А. Хохлачев<sup>1</sup>, \*, М. О. Рязанцева<sup>1</sup>, Л. С. Рахманова<sup>1</sup>,  
Ю. И. Ермолаев<sup>1</sup>, И. Г. Лодкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*aleks.xaa@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.03.2021 г.

После доработки 04.05.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В работе исследуются вариации на масштабах  $10^4$ – $10^5$  км и локальные пространственные неоднородности плотности протонов  $N_p$ , дважды ионизированных ионов гелия ( $\alpha$ -частиц)  $N_\alpha$  и относительного содержания гелия  $N_\alpha/N_p$  в солнечном ветре. Анализируются измерения на двух космических аппаратах *СПЕКТР-Р* и *WIND*, разнесенных в пространстве на расстояние более 1 млн км, и определяется коэффициент корреляции между измерениями соответствующих параметров на различных временных интервалах. Для интервалов с высоким в целом уровнем корреляции параметров плазмы проанализированы вариации уровня локальной (на более коротких подынтервалах) корреляции. Показано, что сравнительно часто встречаются области с низким уровнем локальной корреляции всех исследуемых параметров. Уровень локальной корреляции зависит от типа крупномасштабного течения солнечного ветра, а также от переносной скорости потока и степени вариабельности потока. Кроме того, низкий уровень локальной корреляции часто характеризуется отрицательной компонентой  $B_x$  межпланетного магнитного поля. Выделены области локальных пространственных неоднородностей по плотностям протонов, гелия и относительному содержанию гелия и проведена оценка их размера.

DOI: 10.31857/S0023420621060029

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, течение солнечного ветра (СВ) носит неламинарный характер, и в нем наблюдаются разнообразные вариации физических свойств на различных пространственных и временных масштабах [1, 2]. Часть этих вариаций связана с крупномасштабными ( $>10^6$  км) проявлениями неоднородностей солнечной короны [3, 4], часть – с альфеновскими волнами [5, 6] или потоковыми трубками [7, 8] на масштабах  $\sim 10^5$ – $10^6$  км. На малых масштабах ( $<10^5$  км) резкие и большие по амплитуде изменения параметров связаны, как правило, с различными разрывами в плазме [9–11].

Сравнение измерений параметров на нескольких КА является эффективным методом исследования пространственной неоднородности плазмы, а также динамики структур солнечного ветра и оценки их характерных масштабов. Так, в работе [12] авторы анализировали структуры магнитного поля солнечного ветра на двух аппаратах и показали, что характерные корреляционные длины составляют  $\sim 45 R_E$  ( $\sim 2.9 \cdot 10^5$  км,  $R_E$  – часто используемая в магнитосферной физике величина радиуса Земли, равная 6371.2 км) в радиальном

направлении и  $\sim 80 R_E$  ( $\sim 5.1 \cdot 10^5$  км) в поперечном направлении. В работах [13–16] сравнивались измерения параметров при значительном разнесении аппаратов в плоскости, перпендикулярной направлению Солнце–Земля, и было выявлено, что коэффициент корреляции в среднем значительно снижается при увеличении расстояния от  $50 R_E$  ( $\sim 3.2 \cdot 10^5$  км) до  $90 R_E$  ( $\sim 5.7 \cdot 10^5$  км). Также было показано, что наиболее важными факторами, влияющими на корреляцию параметров, измеренных на двух разнесенных аппаратах, являются: степень изменчивости параметров, направление вектора межпланетного магнитного поля к линии Солнце–Земля и переносная скорость солнечного ветра. Отметим, что оценки масштабов исследуемых структур в вышеуказанных работах в среднем соответствуют диаметру потоковых трубок в солнечном ветре [7].

Наряду с протонной компонентой, вариации которой хорошо изучены (см. ссылки выше), в СВ содержится  $\sim 4\%$  двукратно ионизированных ионов гелия  $He^{++}$  (альфа-частиц), параметры которых также варьируют. Гелиевую компоненту солнечного ветра начали изучать в одно время с началом регулярных измерений солнечного ветра

в 1960-х гг. [17, 18], и эти исследования остаются актуальными и в настоящее время. Одним из наиболее важных параметров состояния плазмы солнечного ветра является относительное содержание ионов гелия  $N_{\alpha}/N_p$  — отношение плотности гелия  $N_{\alpha}$  к плотности протонов  $N_p$ , сильные изменения которого на больших масштабах являются проявлением смены коронального источника [19–22]. Таким образом, сравнение параметров гелиевой и протонной компоненты солнечного ветра помогает понять свойства верхней короны Солнца и особенности механизмов формирования солнечного ветра в ней. Относительное содержание гелия в среднем составляет около 2–3% в медленном спокойном СВ, около 4–5% в быстрых потоках из корональных дыр и может увеличиваться примерно в 2–4 раза (до ~20%) в событиях ICME [1, 21, 23]. Измерения на околоземной орбите показывают [24–26], что границы между разными крупномасштабными явлениями часто сопровождаются значительными изменениями содержания гелия. При этом такие изменения могут происходить сравнительно быстро — за времена порядка нескольких секунд. Так, например, в работе [27] было показано, что наблюдается резкое возрастание содержания ионов гелия вблизи межпланетных ударных волн. Кроме того, имеется зависимость относительного содержания гелия от цикла солнечной активности [28]. В периоды максимума солнечной активности, когда происходит максимальное количество транзитных явлений в солнечной короне, относительное содержание гелия имеет самые высокие значения. При уменьшении количества подобных явлений, вблизи минимумов солнечной активности, наблюдается в среднем минимальное значение относительного содержания гелия.

Помимо изменения относительного содержания гелия на границах крупномасштабных структур, оно также может значительно (от нескольких процентов до десятков процентов) варьировать за времена порядка единиц-десятков секунд [29, 30]. При этом в работе [29] показано, что быстрые вариации относительного содержания ионов гелия, как правило, наблюдаются на фоне положительной корреляции плотностей гелия и протонов, а отрицательная корреляция встречается в 3–5 раз реже, чем положительная. Также авторы показали, что в потоке солнечного ветра можно выделить области с постоянным характером связи плотностей протонов и ионов гелия на масштабах ~50–300 с. В работе [30] показано, что еще меньшие по масштабу вариации относительного содержания гелия (на временах ~3–30 с) происходят на фоне отсутствия заметных изменений других параметров плазмы, и предполагается, что большинство таких переходов связано с турбулентными процессами в солнечном ветре.

Несмотря на то, что исследованиям относительного содержания гелия в солнечном ветре посвящено значительное число работ (например, работы [24–26, 28] и ссылки в них), в большинстве из них рассматриваются усредненные среднечасовые значения параметров протонов и ионов гелия. Мелкомасштабная динамика гелиевой компоненты исследуется сравнительно редко (например, в [27, 29, 30]), и эти исследования носят несистематический характер. В данной работе рассматриваются вариации плотности протонов и дважды ионизированных ионов гелия в солнечном ветре на масштабах  $10^4$ – $10^5$  км на основе кросс-корреляционного анализа измерений параметров плазмы на КА *СПЕКТР-Р* и *WIND* с высоким временным разрешением. Кроме того, исследуются локальные пространственные неоднородности потока (структуры, наблюдаемые только одним из КА) и анализируются их свойства. В отличие от работ [13–16], описанных выше, в данной работе рассматриваются корреляции на меньших временных масштабах. Кроме того, уделяется внимание вариациям плотности гелия и относительного содержания гелия, не рассмотренным в указанных выше работах.

## 1. МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для исследования вариаций протонов и дважды ионизированных ионов гелия (далее по тексту “гелия” для краткости) в работе использовались измерения параметров плазмы (плотности, скорости, температуры протонов, плотности и относительного содержания ионов гелия) на КА *СПЕКТР-Р* (спектрометр БМСВ [31, 32]) и на КА *WIND* (спектрометры SWE [33] и 3DP [34]). Также привлекались измерения параметров межпланетного магнитного поля на КА *WIND* (магнитометр MFI [35]). КА *WIND* и *СПЕКТР-Р* были разнесены в среднем на  $230 R_E$  ( $\sim 1.5 \cdot 10^6$  км) вдоль оси  $X$  GSE системы координат (направленной на Солнце) и вплоть до  $140 R_E$  ( $\sim 8.9 \cdot 10^5$  км) в плоскости  $YZ$ , перпендикулярной оси  $X$ . При этом расстояния между аппаратами вдоль оси  $X$  и в поперечном направлении в явном виде не связаны между собой. Использовались измерения, представленные в соответствующих базах данных: <http://catalog-sw-msh.plasma-f.cosmos.ru/>, <http://aurora.troja.mff.cuni.cz/spekt-r/project/> для прибора БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* и <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> для приборов SWE, 3DP и MFI на КА *WIND*. Временное разрешение используемых данных составило 3 с для приборов БМСВ и 3DP, 60 с для прибора MFI и 90 с для прибора SWE.

Для проведения анализа отбирались интервалы одновременных измерений вышеупомянутых параметров в солнечном ветре на обоих КА за период с 2011 по 2015 гг. Данный период затрагивает

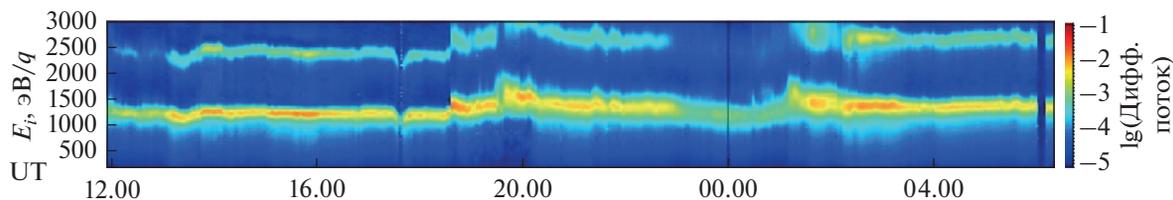


Рис. 1. Энергетическая спектрограмма потока ионов солнечного ветра для одного из интервалов (19.IV.2014 12.00–20.IV.2014 06.00 UT) по измерениям прибора БМСВ на КА СПЕКТР-Р.

три фазы 24 цикла солнечной активности: фазу роста солнечной активности в 2011–2012 гг., фазу максимума солнечной активности в 2012–2014 гг. и фазу спада солнечной активности в 2015 г. Основным критерием отбора интервалов было наличие отчетливой компоненты гелия на энергетических спектрограммах прибора БМСВ (<http://aurora.troja.mff.cuni.cz/spektr-r/project/>). Помимо этого, продолжительность исследуемых интервалов должна составлять не менее четырех часов, а также не должно быть длительных промежутков с отсутствием измерений. На рис. 1 показан пример энергетической спектрограммы в диапазоне 120–3000 эВ/заряд. Цветом показана интенсивность потока: синий цвет показывает минимум интенсивности, красный цвет – максимальную интенсивность. На спектрограмме четко видно два максимума. Из них наиболее интенсивный нижний, при значениях 1000–1500 эВ/заряд, соответствует протонам, а верхний, менее интенсивный, с максимумом около 2000–3000 эВ/заряд – дважды ионизированным ионам гелия. Измерения энергетических спектров прибором БМСВ, как правило, производились в диапазоне 100–3000 эВ/заряд, в результате чего при значениях переносной скорости потока  $\geq 550$  км/с максимум, соответствующий дважды ионизированным ионам гелия, выходил за пределы диапазона, и гелий не мог быть зарегистрирован прибором. При высоких температурах протонов ( $> 15$  эВ) выделение гелия из интегрального потока также было затруднено. В итоге для анализа был отобран 41 интервал с длительностью от четырех часов до полутора суток и общей продолжительностью  $\sim 500$  ч.

Измерения на двух КА сравнивались путем проведения кросс-корреляционного анализа плотности протонов, плотности и относительно содержания гелия с помощью специально разработанного программного обеспечения. Работа программы делится на четыре этапа, которые проводились для каждой из четырех пар измерений на двух КА: плотности протонов по измерениям приборов БМСВ и SWE, плотности протонов, гелия и относительно содержания гелия по измерениям приборов БМСВ и ZDP.

На первом этапе рассчитывался временной сдвиг  $dT_0$  между измерениями на КА СПЕКТР-Р и WIND, соответствующий примерному времени

распространения солнечного ветра между аппаратами:  $dT_0 = r/V$ , где  $r$  – расстояние между КА вдоль линии Солнце–Земля,  $V$  – величина переносной скорости солнечного ветра.

На втором этапе для каждого из рассматриваемых параметров проводилось вычисление коэффициента корреляции  $R$  на всем интервале (далее по тексту – крупномасштабный коэффициент корреляции) и временного сдвига  $dT_1$ , при котором достигалось максимальное значение коэффициента корреляции:

$$dT_1 = \max(R(N_{s/c1}(t + dt), N_{s/c2}(t))),$$

$$dT_0 - 30 \text{ мин} < dt < dT_0 + 30 \text{ мин},$$

где  $N_{s/c1}(t)$  – временной ряд рассматриваемого параметра по измерениям на КА WIND,  $N_{s/c2}(t)$  – аналогичный временной ряд по измерениям на спутнике СПЕКТР-Р,  $R$  – коэффициент кросс-корреляции между указанными временными рядами,  $t$  – время измерений,  $dt$  – текущий сдвиг временного ряда  $N_{s/c1}(t)$  относительно временного ряда  $N_{s/c2}(t)$ ,  $dT_1$  – временной сдвиг между данными после корректировки. При этом текущий сдвиг  $dt$  и, соответственно, конечный сдвиг  $dT_1$  не могут отличаться от расчетного времени распространения потока между спутниками  $dT_0$  более чем на 30 мин.

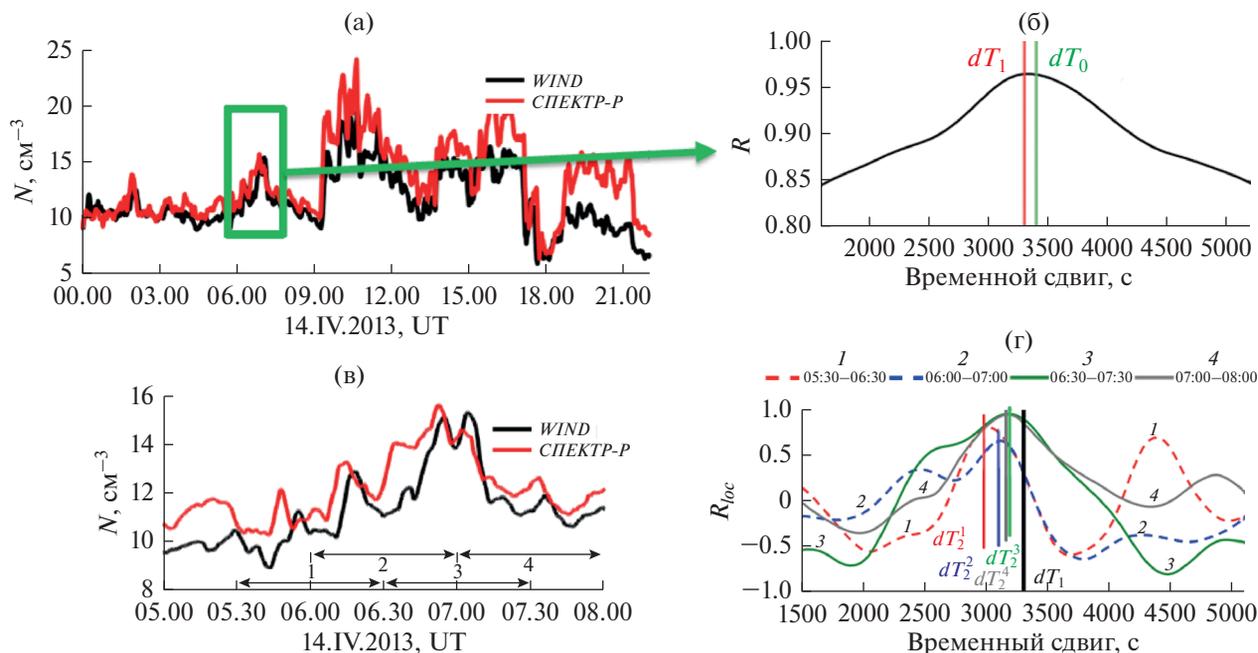
На третьем этапе проводилось разбиение рассматриваемого интервала на более короткие подынтервалы длительностью в 1 ч (всего было выделено 866 подынтервалов). Соседние подынтервалы перекрывали друг друга на 30 мин, что позволило избежать потери информации на их границах.

После этого для каждого подынтервала аналогично второму этапу вычислялся коэффициент корреляции  $R_{loc}$  (далее по тексту – локальный коэффициент корреляции) и временной сдвиг  $dT_2$  (локальный временной сдвиг), при котором достигалось максимальное значение  $R_{loc}$ :

$$dT_2 = \max(R_{loc}(N_{s/c1}(t_{sub\_int} + dt), N_{s/c2}(t_{sub\_int}))),$$

$$dT_1 - 30 \text{ мин} < dt < dT_1 + 30 \text{ мин}.$$

Здесь так же, как и выше,  $N_{s/c1}(t)$  и  $N_{s/c2}(t)$  – временные ряды рассматриваемых параметров, измеренных на КА WIND и СПЕКТР-Р соответственно,



**Рис. 2.** (а) Пример измерений плотности протонов по данным КА *WIND* (прибор 3DP, черная линия) и *СПЕКТР-Р* (прибор БМСВ, красная линия) для события 14.IV.2013. Измерения по *WIND* сдвинуты на  $dT_1$  (см. текст). (б) Зависимость коэффициента корреляции  $R$  между временными рядами измерений плотности протонов от сдвига по времени между временными рядами  $dt$  для рассматриваемого примера. (в) Измерения плотности протонов на двух КА 14.IV.2013 на трехчасовом интервале. Стрелками показаны границы некоторых подынтервалов часовой длительности, на которые разбивался изначальный интервал (см. текст). (г) Зависимости коэффициентов корреляции  $R_{loc}$  между временными рядами измерений плотности на двух КА от временного сдвига  $dt$  между ними на подынтервалах, выделенных на рисунке (в).

$R_{loc}$  — коэффициент кросс-корреляции между этими рядами,  $t_{sub\_int}$  — время измерений,  $dt$  — текущий сдвиг между временными рядами,  $dT_2$  — конечный временной сдвиг или, другими словами, уточненное время распространения потока для конкретного подынтервала.

Выше представлен алгоритм работы программы на примере одного из отобранных интервалов: 14.IV.2013 00.00–22.00. На рис. 2а показан временной ход плотности протонов по измерениям прибора БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* (красная линия) и прибора SWE на КА *WIND* (черная линия). На рис. 2б показана зависимость крупномасштабного коэффициента корреляции  $R$  от временного сдвига между временными рядами измерений  $dt$ . Для рассматриваемого в качестве примера интервала расстояние между спутниками составило  $253 R_E$  ( $\sim 1.6 \cdot 10^6$  км), а переносная скорость потока была равна  $\sim 475$  км/с. Таким образом,  $dT_0 \approx 3400$  с, соответственно,  $dt$  лежит в пределах от 1600 до 5200 с. Максимум функции зависимости коэффициента корреляции  $R$  от сдвига  $dt$  четко виден и приходится на  $dt = 3300$  с, поэтому фактическое время распространения потока между аппаратами  $dT_1$  отличается на 100 с от расчетного времени распространения  $dT_0$ . Временной ход плотности протонов по данным КА *WIND* на рис. 2а сдвинут на время  $dT_1$ . Видно хо-

рошее соответствие положения границ плазменных структур, наблюдаемых на обоих КА. На рис. 2в показан выделенный на рис. 2а интервал 05.00–08.00, который включает в себя следующие подынтервалы: 05.00–06.00, 05.30–06.30, 06.00–07.00, 06.30–07.30, 07.00–08.00. На рис. 2г показаны зависимости локальных коэффициентов корреляции  $R_{loc}$  на четырех вышеуказанных подынтервалах, которые помечены разными цифрами на рис. 2в и 2г, от сдвига  $dt$ . Аналогично сказанному выше для всего интервала в целом, фактическое время распространения между аппаратами  $dT_2$  равно сдвигу  $dt$ , при котором коэффициент корреляции на конкретном подынтервале максимален.

По результатам проведения кросс-корреляционного анализа для всех четырех пар исследуемых параметров (плотности протонов по измерениям приборов БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* и SWE на КА *WIND*, плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия по измерениям приборов БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* и 3DP на КА *WIND*) составлялась сводная таблица. Для каждого рассматриваемого подынтервала таблица включала в себя значения коэффициентов крупномасштабной  $R$  и локальной  $R_{loc}$  корреляции, временные сдвиги  $dT_1$  и  $dT_2$ , рассчитанные для каждой пары измерений, средние значения, величины стандартного отклонения SD и относительного стан-

дартного отклонения RSD рассмотренных параметров, а также средние значения остальных параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Таблица дополнялась координатами КА в системе координат GSE в момент измерений и расстоянием между КА в плоскости  $YZ$   $dL = \sqrt{(Y_{WIND} - Y_{СПЕКТР-Р})^2 + (Z_{WIND} - Z_{СПЕКТР-Р})^2}$ . Кроме того, для каждого подынтервала определялся и записывался в таблицу тип крупномасштабного течения, к которому он относился. Тип течения солнечного ветра определялся с помощью каталога крупномасштабных явлений ИКИ (<http://www.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/>, [36]). Среди анализируемых интервалов были выделены следующие типы течений: медленные и быстрые квазистационарные потоки (SLOW, FAST), межпланетные выбросы корональной массы (MC, EJECTA), области сжатой плазмы (SHEATH, CIR) и гелиосферный токовый слой (HCS). В силу приборных ограничений (см. выше по тексту) на рассмотренных интервалах, соответствующих быстрым потокам FAST, MC и EJECTA, скорость составляла менее 550 км/с. Распределение типов течений в рассмотренной выборке интервалов показано на рис. 3, где каждый столбец гистограммы соответствует одному из крупномасштабных типов течений, а на оси ординат отложена вероятность наблюдения данного типа течения в рассмотренной выборке.

Для дальнейшего анализа отобраны подынтервалы, в которых крупномасштабный коэффициент корреляции составил  $R > 0.7$ . Такое значение коэффициента корреляции указывает на качественно хорошее соответствие структур, наблюдаемых на двух аппаратах, и дает основание утверждать, что одни и те же крупномасштабные структуры последовательно пролетели мимо обоих космических аппаратов. Доля подобных подынтервалов составила  $\sim 75\%$  от общего количества.

Измерения прибора SWE (КА WIND) в основном использовались для проверки данных, так как прибор 3DP в ряде случаев дает заниженные значения плотности протонов. Результаты анализа показали, что между коэффициентами корреляции, вычисленными по парам приборов SWE-БМСВ и 3DP-БМСВ, практически отсутствует разница, поэтому ниже приводятся результаты для пар измерений, проведенных приборами БМСВ (КА СПЕКТР-Р) и 3DP (КА WIND).

На базе полученной сводной таблицы проводился дальнейший статистический анализ величины локального коэффициента корреляции на отобранных подынтервалах при разных условиях и в различных типах крупномасштабных явлений солнечного ветра, а также исследование связи коэффициента корреляции и характеристик плазмы солнечного ветра.

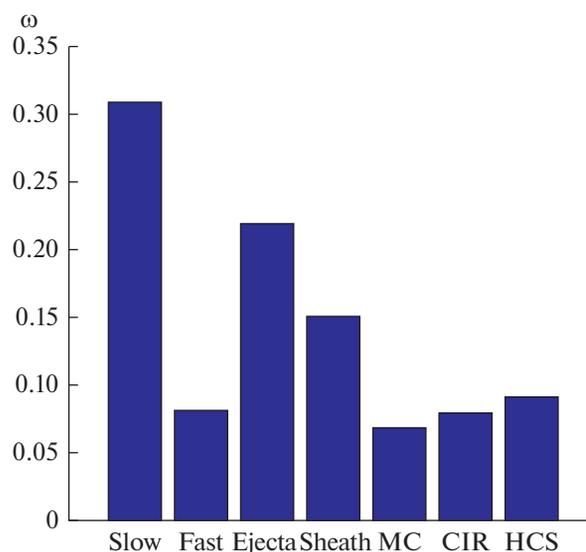


Рис. 3. Распределение типов течений солнечного ветра на отобранных для анализа подынтервалах.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Статистический анализ локальных коэффициентов корреляций по плотности протонов, гелия и относительному содержанию гелия

В интервалах, отобранных для анализа, изменения параметров плазмы на двух разнесенных в пространстве КА WIND и СПЕКТР-Р, как правило, хорошо соответствуют друг другу. Как уже говорилось ранее в разделе 1, были отобраны только те интервалы, в которых крупномасштабный коэффициент корреляции составил  $R > 0.7$ . При этом локально могут наблюдаться существенные отличия между структурами, регистрируемыми на разных КА. В таких случаях локальный коэффициент корреляции  $R_{loc}$  на часовом подынтервале может быть значительно ниже крупномасштабного коэффициента корреляции  $R$ . На рис. 4 представлен пример длительного интервала измерений относительного содержания ионов гелия на КА WIND (прибор 3DP) и на КА СПЕКТР-Р (прибор БМСВ) 19.IV.2014 12.00–20.IV.2014 06.00. Коэффициент крупномасштабной корреляции на интервале составил  $R = 0.81$ , а сдвиг по времени  $dT_1 = 3060$  с. При этом можно выделить отдельные подынтервалы с существенно различающимся значением локального коэффициента корреляции. Так, на подынтервале 1 (19.IV.2014 13.30–14.30)  $R_{loc} = 0.97$ , и видно, что локальная плазменная структура детально повторяется по наблюдениям на обоих КА. На подынтервале 3 (20.IV.2014 01.00–02.00)  $R_{loc} = 0.83$ , плазменная структура регистрируется обоими спутниками, но ее форма значительно различается, в связи с чем коэффициент корреляции ниже, чем на

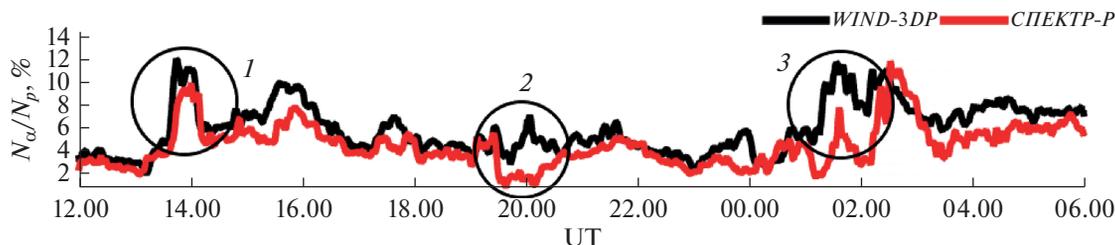


Рис. 4. Измерения относительного содержания гелия по данным КА WIND (прибор 3DP, черная линия) и СПЕКТР-Р (прибор БМСВ, красная) для события 19.IV.2014.

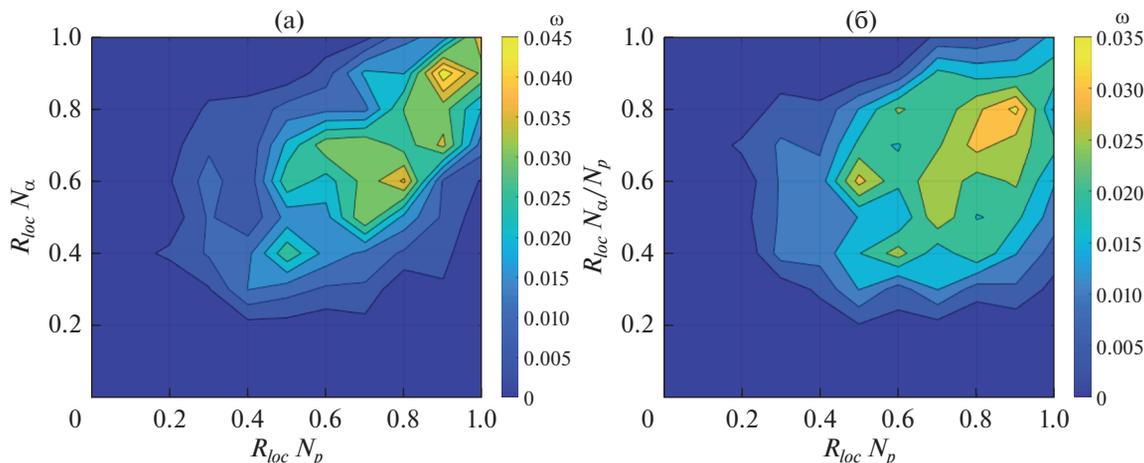


Рис. 5. Распределения локальных коэффициентов корреляций  $R_{loc}$  по плотности (а) и относительному содержанию гелия (б) в зависимости от локального коэффициента  $R_{loc}$  по плотности протонов.

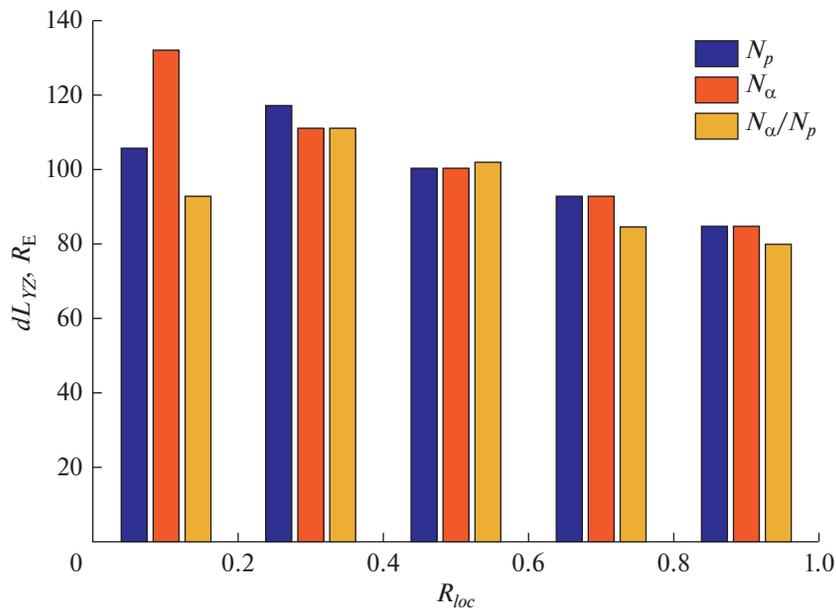
подынтервале 1. На подынтервале 2 (19.IV.2014 19.30–20.30)  $R_{loc} = 0.13$ , и видно, что на фоне хорошего соответствия временного хода относительного содержания гелия на двух КА на всем интервале в целом на данном подынтервале на КА WIND наблюдается локальная плазменная структура, которая не видна по измерениям на КА СПЕКТР-Р. Подобные случаи можно интерпретировать как локальные плазменные неоднородности, размер которых в плоскости, перпендикулярной линии Солнце–Земля, меньше, чем расстояние между КА.

На рис. 5 представлены двумерные статистические распределения локальных коэффициентов корреляций  $R_{loc}$ : по плотности протонов (по оси X на обеих панелях), по плотности гелия (по оси Y на рис. 5а) и по относительному содержанию гелия (по оси Y на рис. 5б). Цветом на рисунках показана вероятность наблюдения  $R_{loc}$  в фиксированном диапазоне значений. Соответственно, значения  $R_{loc}$  для каждого из параметров разделены на 10 диапазонов с шагом 0.1.

Примерно в половине случаев значение локального коэффициента корреляции превышает 0.6 для каждого из рассматриваемых параметров. Однако, как видно из рисунка, для значительного

числа подынтервалов  $R_{loc} < 0.6$ . Число таких случаев составляет ~40% для плотности протонов, ~45% для плотности гелия и ~55% для относительного содержания гелия. В среднем же значение  $R_{loc}$  равно 0.65 по плотности протонов, 0.61 по плотности гелия и 0.58 по относительному содержанию гелия.

Кроме того, рис. 5 также показывает связь значений локальных коэффициентов корреляций для различных параметров друг с другом. Видно, что, как правило, при высоком значении  $R_{loc}$  по плотности протонов также наблюдаются высокие значения  $R_{loc}$  для плотности и относительного содержания гелия. Однако можно выделить случаи, когда при высоких значениях локального коэффициента корреляции по одному из параметров  $R_{loc} > 0.7$  наблюдаются низкие значения  $R_{loc} < 0.6$  по другому параметру. Подобное несоответствие наблюдается в ~15% всех случаев. Из них 10% приходится на ситуации, когда при высоких значениях локального коэффициента корреляции по протонам наблюдаются низкие значения коэффициентов корреляции по гелию, и 5% — на зеркальные случаи, где при низких значениях коэффициента корреляции по плотности протонов значения коэффициента корреляции по плотности гелия сравнительно высоки. Этот результат



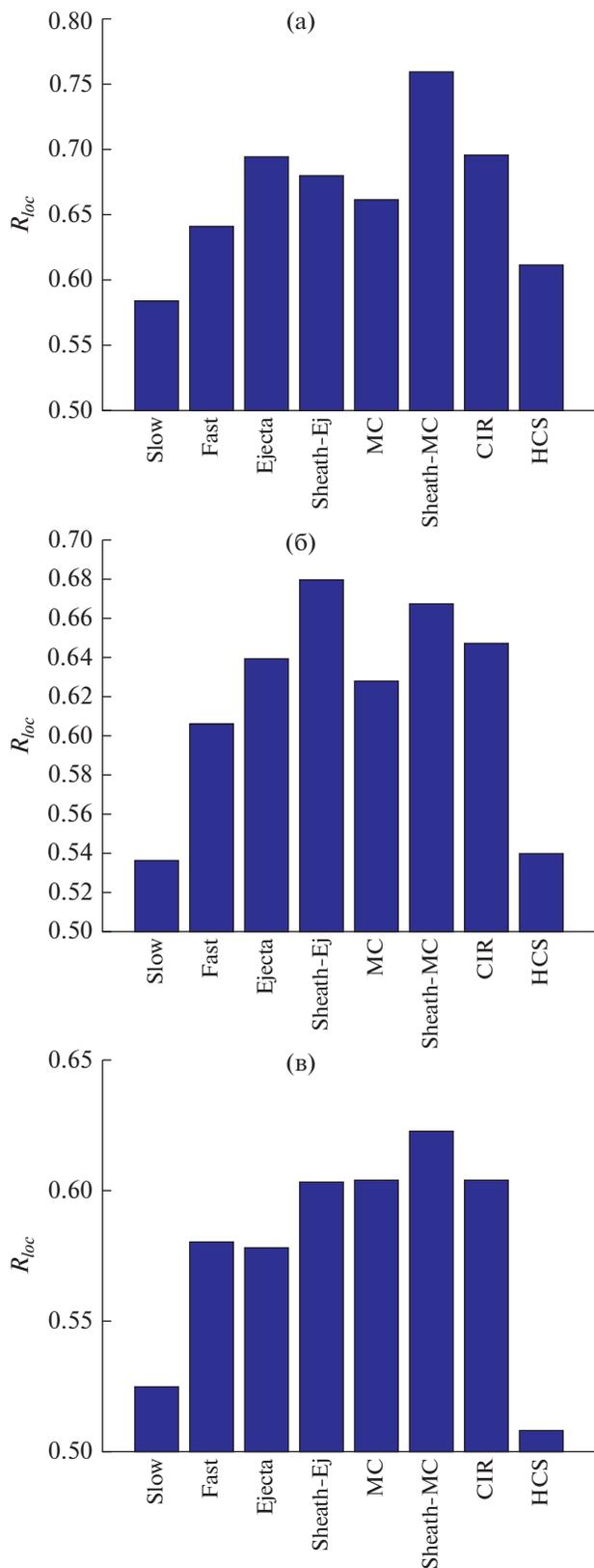
**Рис. 6.** Связь расстояния между спутниками в плоскости  $YZ$  и локального коэффициента корреляции  $R_{loc}$  по плотности протонов  $N_p$ , гелия  $N_\alpha$  и относительному содержанию гелия  $N_\alpha/N_p$ .

свидетельствует о том, что локальные неоднородности в плазме, т.е. ситуации, когда возмущение по протонам или гелию регистрируется только одним из КА, могут наблюдаться только по одному из рассматриваемых параметров, тогда как по второму параметру будет сохраняться хорошее соответствие его временного хода на обоих КА.

### 2.2. Факторы, определяющие локальные коэффициенты корреляции по плотности протонов, гелия и относительному содержанию гелия

Как было показано в разделе 2.1, низкие значения  $R_{loc}$  могут быть связаны с локальными неоднородностями в плазме, наблюдаемыми только одним из двух КА. В связи с этим сравнение  $R_{loc}$  на подынтервалах с различным взаимным расположением аппаратов дает возможность грубо оценить размеры этих локальных неоднородностей: если расстояние между аппаратами в плоскости, перпендикулярной линии Солнце–Земля, превышает размер неоднородностей, возмущение будет видно только на одном КА, и, соответственно, коэффициент локальной корреляции будет принимать низкие значения. На рис. 6 показана связь коэффициентов локальной корреляции  $R_{loc}$  для всех рассмотренных параметров с расстоянием между спутниками в плоскости  $YZ$ . Весь набор подынтервалов был разделен на 5 групп по значению коэффициента корреляции  $R_{loc}$  в диапазонах с шагом 0.2. По оси абсцисс указаны диапазоны значений соответствующего локального коэффициента корреляции, а по оси ординат показаны

медианные значения расстояний между космическими аппаратами в плоскости  $YZ$  на подынтервалах со значениями  $R_{loc}$ , которые принадлежат этим диапазонам. Различными цветами показаны гистограммы локальных коэффициентов корреляции для разных пар параметров (плотности протонов  $N_p$ , плотности гелия  $N_\alpha$  и относительного содержания гелия  $N_\alpha/N_p$ ). Видно, что наиболее высокие коэффициенты корреляции наблюдаются для интервалов с медианным значением расстояния  $\sim 85 R_E$  ( $\sim 5.4 \cdot 10^5$  км), тогда как низкий коэффициент корреляции, напротив, характерен для тех интервалов, где медианное значение расстояния в плоскости  $YZ$  превышает  $110 R_E$  ( $\sim 7 \cdot 10^5$  км). Таким образом, увеличение расстояния между спутниками приводит к уменьшению значений локальных коэффициентов корреляции. Хотя по этим результатам нельзя точно определить масштаб возможных локальных неоднородностей (для этого нужны измерения как минимум с еще одного спутника), но можно предположить, что размер этих неоднородностей в плоскости  $YZ$  составляет  $\sim 85 R_E$  ( $\sim 5.4 \cdot 10^5$  км). Эта ситуация наблюдается для локальных неоднородностей как по плотности протонов, так и по плотности и относительному содержанию гелия. Отметим, что эти оценки близки к корреляционным длинам, определенным в работах [12–16]. Результаты упомянутых работ относятся к измерениям протонов, оценки для корреляций по плотности и относительному содержанию гелия получены в данной работе впервые.

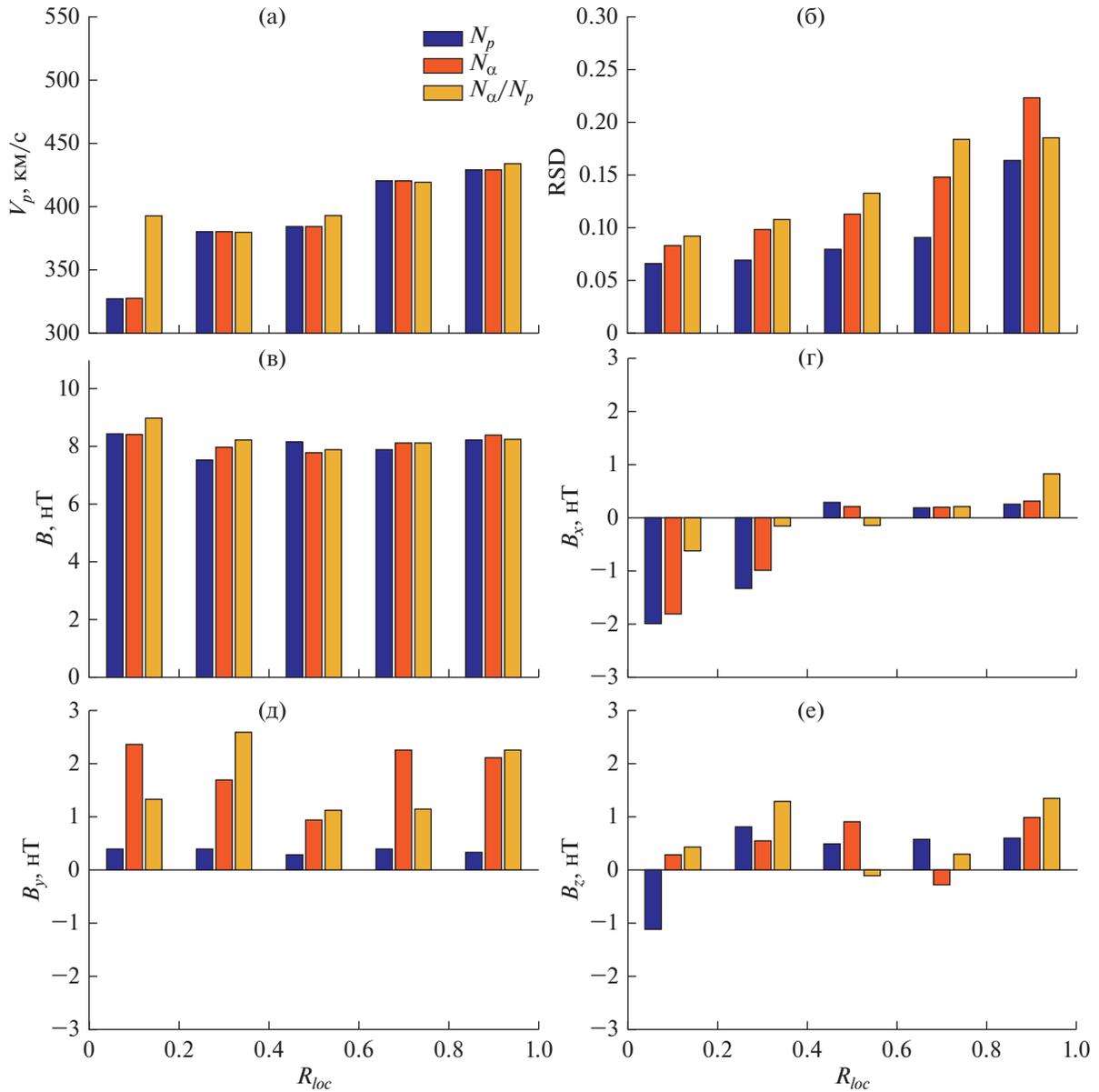


**Рис. 7.** Гистограммы медианных значений локальных коэффициентов корреляций  $R_{loc}$  по плотности протонов (а), по плотности гелия (б) и по относительному содержанию гелия (в) в разных типах крупномасштабных течений солнечного ветра.

Далее была рассмотрена связь значений локальных коэффициентов корреляции с типами крупномасштабных течений солнечного ветра. На рис. 7 представлены соответствующие гистограммы для локальных коэффициентов корреляций всех рассмотренных параметров:  $N_p$ ,  $N_\alpha$  и  $N_\alpha/N_p$ . Каждый столбец соответствует одному из крупномасштабных типов солнечного ветра (см. раздел 1). Высота столбца соответствует медианному значению  $R_{loc}$  для каждой группы подынтервалов, отнесенной к одному из типов ветра. Видно, что наименьшие медианные значения  $R_{loc}$  наблюдаются в медленных квазистационарных течениях и гелиосферном токовом слое для корреляций по всем рассмотренным парам параметров. Самые высокие медианные значения  $R_{loc}$  наблюдаются в потоках сжатой плазмы SHEATH перед MC и EJECTA. Следует отметить, что для подынтервалов внутри высокоскоростных квазистационарных потоков из корональных дыр медианное значение  $R_{loc}$  не превышает 0.6, т.е. высокие значения локальных коэффициентов корреляции характерны только для интервалов в высокоскоростных потоках, связанных с возмущенными областями сжатия типа SHEATH.

Также было проведено сравнение параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного поля для подынтервалов с различными значениями локальных коэффициентов корреляции (см. рис. 8). Аналогично рис. 6, рассматриваемый набор подынтервалов был разделен на группы в зависимости от величины коэффициента корреляции  $R_{loc}$ , каждая группа представлена отдельным столбцом гистограммы на рис. 8 (диапазон значений  $R_{loc}$  указан на оси абсцисс). Для каждой группы вычислены средние и медианные значения параметров плазмы солнечного ветра на основе измерений прибора БМСВ (КА СПЕКТР-Р) и межпланетного магнитного поля на основе измерений прибора MFI (КА WIND). Некоторые группы содержали сравнительно небольшое число подынтервалов, в связи с чем средние значения не всегда адекватно отображали выборку, и поэтому на рис. 8 высота каждого столбца соответствует именно медианному значению параметров в указанном диапазоне  $R_{loc}$ . Столбцы гистограмм разных цветов, аналогично рис. 6, относятся к корреляциям по различным парам параметров.

Соответствующие зависимости представлены на рис. 8 для некоторых параметров плазмы, а также модуля и компонент межпланетного магнитного поля. На рис. 8а видно, что более высокие значения  $R_{loc}$  наблюдаются при более высокой скорости потока (более 400 км/с), что, вероятно, является следствием высоких значений локальных коэффициентов корреляции, наблюдающихся в областях сжатия плазмы типа SHEATH,



**Рис. 8.** Связь параметров плазмы и межпланетного магнитного поля с локальным коэффициентом корреляции  $R_{loc}$  по плотности протонов  $N_p$ , гелия  $N_\alpha$  и относительному содержанию гелия  $N_\alpha/N_p$  для: (а) скорости протонов  $V_p$ ; (б) относительного стандартного отклонения RSD соответствующего параметра; (в), (г), (д), (е) модуля  $B$  и компонент  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  межпланетного магнитного поля соответственно.

скорости потока в которых, как правило, достаточно высоки.

Также на рис. 8б четко видна связь локальных коэффициентов корреляции со значениями параметра RSD: более высокие значения  $R_{loc}$  наблюдаются при более высоком значении RSD соответствующего параметра (более 15%), и, напротив, на подынтервалах с низким значением RSD коэффициент локальной корреляции тоже низкий. Следует отметить, что коэффициент RSD косвенно отражает уровень variability параметра, т.е. наличие или отсутствие мелко- и среднemasштабных структур на рассматриваемом интервале. Другими

словами, к снижению значений локального коэффициента корреляции  $R_{loc}$  наряду с присутствием локальных неоднородностей в плазме может приводить отсутствие на рассматриваемом подынтервале каких-либо плазменных структур.

Зависимость значений коэффициента корреляции  $R_{loc}$  от модуля межпланетного магнитного поля (ММП) не была обнаружена (рис. 8в), однако для отобранных в работе интервалов была обнаружена связь  $R_{loc}$  с  $B_x$  компонентой ММП (рис. 8г) для всех рассмотренных параметров. Так, например, в случае анализа корреляции по плотности гелия

для выборки случаев с  $R_{loc} > 0.6$  медианное значение  $B_x$  лежит вблизи нуля и составляет 0.26 нТ, а для случаев с низкими значениями локального коэффициента корреляции  $R_{loc} < 0.4$  медианное значение компоненты  $B_x$  смещено в сторону отрицательных значений и равно  $-1.3$  нТ. Аналогичная ситуация наблюдалась и в случае анализа корреляций по плотности протонов и относительному содержанию гелия. Однако в рассмотренном ограниченном наборе интервалов распределение  $B_x$  компоненты ММП не соответствовало нормальному, вследствие чего связь значений локальных коэффициентов корреляции с компонентой  $B_x$  нуждается в дополнительной проверке по расширенному статистическому материалу. Этот вопрос будет более подробно исследован в последующих работах. Для плотностей протонов, гелия, относительного содержания гелия и температуры четкие зависимости также не были обнаружены и не представлены на рисунках. Отметим, что для локальных корреляций всех трех пар параметров (плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия) наблюдаются схожие зависимости на всех панелях рис. 8.

## ВЫВОДЫ

Исследование одновременных измерений на двух разнесенных в пространстве КА *СПЕКТР-Р* и *WIND* позволяет наблюдать вариации параметров плазмы при распространении потока от одного спутника до другого и дает возможность выделить локальные пространственные неоднородности потока в плоскости, перпендикулярной линии Солнце—Земля. По результатам кросс-корреляционного анализа и последующего статистического анализа значений локальных коэффициентов корреляции плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия было показано, что:

1. При высоком коэффициенте корреляции параметров плазмы на двух КА на интервале в целом локальное поведение плотности протонов, гелия и относительного содержания гелия на одном КА может не соответствовать аналогичным измерениям на другом. При этом низкие значения локального коэффициента корреляции  $R_{loc} < 0.6$  встречаются довольно часто: в 40% случаев для плотности протонов, в 45 и 55% — для плотности гелия и его относительного содержания. В 15% случаев низкий локальный коэффициент корреляции наблюдается только по одному из параметров.

2. Величина локального коэффициента корреляции рассматриваемых параметров в значительной степени зависит от типа крупномасштабного течения солнечного ветра: самые низкие значения наблюдаются в медленных течениях и гелиосферном токовом слое, тогда как наибольшие значения характерны для потоков плазмы перед магнитными облаками.

3. Низкие значения локального коэффициента корреляции по плотности протонов, гелия и относительному содержанию гелия часто наблюдаются в потоках с низким уровнем относительных вариаций соответствующего параметра, с пониженной скоростью протонов, а также часто при отрицательной компоненте  $B_x$  межпланетного магнитного поля.

4. Области с низкими значениями локального коэффициента корреляции параметров плазмы указывают, в частности, на существование локальных пространственных неоднородностей потока. Оценка показывает, что размер подобных неоднородностей как для протонов, так и для гелия в плоскости  $YZ$  составляет  $\sim 85 R_E$  ( $\sim 5.4 \cdot 10^5$  км).

5. Локальные пространственные неоднородности по плотности протонов, гелия и относительному содержанию гелия имеют близкие масштабы и схожие свойства.

В заключение можно сказать, что представленные в работе результаты качественно согласуются с результатами, полученными ранее в лаборатории солнечного ветра Института космических исследований РАН по корреляциям измерений потока ионов и плотности протонов на КА *WIND*, *ИНТЕРБОЛЛ-1* и *IMP-8* [15, 16], однако затрагивают меньшие масштабы вариаций. Кроме того, в настоящей работе в дополнение рассматриваются корреляции измерений параметров дважды ионизированных ионов гелия на КА *СПЕКТР-Р* и *WIND*, и впервые выявлено существование областей с локальными отличиями по плотности и относительному содержанию гелия на одном из КА. Были выявлены связи значений локального коэффициента корреляции с некоторыми параметрами солнечного ветра, однако в силу ограниченности выборки эти исследования требуют уточнения в последующих работах. Проведенный анализ указывает на общую природу возникновения областей локальных пространственных неоднородностей как по плотности протонов, так и по плотности и относительному содержанию гелия: например, вследствие локальных процессов, возникающих из-за разницы скоростей между протонами и ионами гелия.

Авторы благодарны своим коллегам в ИКИ РАН и в Карловом Университете (Прага, Чехия) за возможность использования данных прибора БМСВ на КА *СПЕКТР-Р* (<http://catalog-sw-msh.plasma-f.cosmos.ru/>, <http://aurora.troja.mff.cuni.cz/spektr-r/project/>), а также создателям базы данных спутника *WIND* (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Feldman W.C., Asbrige J.R., Bame S.J et al.* Longterm variations of selected solar wind properties: IMP 6, 7 and 8 results // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. № 5. P. 2177–2189.

2. Schwenn R., Marsch E. Physics of the Inner Heliosphere II. Particles, Waves and Turbulence. Berlin: Springer, 1991.
3. Зеленый Л.М., Милованов А.В. Фрактальная топология и странная кинетика: от теории перколяции к проблемам космической электродинамики // УФН. 2004. Т. 174. № 8. С. 809–852.
4. Ермолаев Ю.И. Где образуются среднемасштабные вариации солнечного ветра? // Геомагнетизм и аэронаука. 2014. Т. 54. № 2. С. 174–175.
5. Bavassano B. Recent observations of MHD fluctuations in the solar wind // Ann. Geophys. 1994. V. 12. P. 97–104.  
<https://doi.org/10.1007/s00585-994-0097-1>
6. Malara F., Primavera L., Veltri P. Compressive fluctuations generated by time evolution of Alfvénic perturbations in the solar wind current sheet // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № A10. P. 21597–21617.
7. Borovsky J.E. Flux tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU? // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № A08.  
<https://doi.org/10.1029/2007JA012684>
8. Bruno R., Carbone V., Veltri P. et al. Identifying intermittency events in the solar wind // Planet. Space Sci. 2001. V. 49(12). P. 1201–1210.
9. Mariani F., Bavassano B., Villante U. A Statistical Study of Magnetohydrodynamic Discontinuities in the Inner Solar System - HELIOS-1 and HELIOS-2 // Solar Physics. 1983. V. 83. № 2. P. 349–365.
10. Horbury T.S., Burgess D., Fränz M. et al. Three spacecraft observations of solar wind discontinuities // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 4. P. 677–680.
11. Riazantseva M.O., Zastenker G.N., Richardson J.D. et al. Sharp boundaries of small- and middle-scale solar wind structures // J. Geophys. Res. 2005. V. 110. № A12.  
<https://doi.org/10.1029/2005JA011307>
12. Chang S.C., Nishida A. Spatial structure of transverse oscillations in the interplanetary magnetic field // Astrophys. Space Sci. 1973. V. 23. P. 301.
13. Crooker N.U., Siscoe G.L., Russell C.T. et al. Factors controlling degree of correlation between ISEE 1 and ISEE 3 interplanetary magnetic field measurements // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 2224.
14. Richardson J.D., Paularena K.I. Plasma and magnetic field correlations in the solar wind // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 239.
15. Zastenker G.N., Dalin P.A., Petrukovich A.A. et al. Solar wind structure dynamics by multipoint observations // Phys. Chem. Earth (C). 2000. V. 25. P. 137.
16. Dalin P.A., Zastenker G.N., Paularena K.I. et al. A Survey of large, rapid solar wind dynamic pressure changes observed by Interball-1 and IMP-8 // Ann. Geophys. 2002. V. 20. P. 293–299.
17. Neugebauer M. Mariner 2 observations of the solar wind average properties // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P. 4469.
18. Ogilvie K.W., Wilkerson T.D. Helium abundance in the solar wind // Solar Phys. 1969. V. 8. № 2. P. 435–449.
19. Geiss J. Processes affecting abundances in the solar wind // Space Sci. Rev. 1982. V. 33. P. 201.
20. Geiss J., Gloeckler G., Von Steiger R. Origin of the solar wind from composition data // Space Sci. Rev. 1995. V. 72. № 1–2. P. 49–60.
21. Ермолаев Ю.И. Наблюдение ионов He<sup>++</sup> в солнечном ветре // Космич. исслед. 1994. Т. 32. № 1. С. 93–125. (Cosmic Research. P. 71.)
22. Zurbuchen T.H., Weberg M., Steiger von R. et al. Composition of coronal mass ejections // Astrophysical J. 2016. V. 826. № 1. P. 10.  
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/10>
23. Yermolaev Y.I., Stupin V.V. Helium abundance and dynamics in different types of solar wind streams: The Prognost 7 observations // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № A2. P. 2125–2136.
24. Richardson J.D., Richardson I.G., Kasper J.C. et al. Helium variation in the solar wind // Proc. ISCS 2003 Symposium. 2003. ESA SP-535. P. 521–526.
25. Kasper J.C., Stevens M.L., Lazarus A.J. et al. Solar wind helium abundance as a function of speed and heliographic latitude variation through a solar cycle // Astrophysical J. 2007. V. 660. № 1. P. 901–910.
26. Kasper J.C., Stevens M.L., Korrecke K.E. et al. Evolution of the relationships between abundance, minor ion charge state, and solar wind speed // Astrophysical J. 2012. V. 745. № 2. P. 162.
27. Сапунова О.В., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н. и др. Поведение ионов He<sup>++</sup> на фронте межпланетной ударной волны // Геомагнетизм и аэронаука. 2020. Т. 60. № 6. P. 720–726.  
<https://doi.org/10.31857/S0016794020060127>
28. Ogilvie K.W., Hirshberg J. The solar cycle variation of the solar wind helium abundance // J. Geophys. Res. 1974. V. 79. № 2. P. 4595–4602.
29. Застенкер Г.Н., Колоскова И.В., Рязанцева М.О. и др. Наблюдение быстрых вариаций содержания ионов гелия в солнечном ветре // Космич. исслед. 2014. Т. 52. № 1. С. 27–38. (Cosmic Research. P. 25–36.)
30. Safrankova J., Nemecek Z., Cagas P. et al. Short-scale variations of the solar wind helium abundance // Astrophysical J. 2013. V. 778. P. 25.
31. Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. et al. Fast solar wind monitor (BMSW): description and first results // Space Sci. Rev. 2013. V. 175(1–4). P. 165–182.  
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-9979-4>
32. Застенкер Г.Н., Шафранкова Я., Немечек З. и др. Быстрые измерения параметров солнечного ветра с помощью прибора БМСВ // Космич. исслед. 2013. Т. 51. № 2. С. 88–99. (Cosmic Research. P. 78–89.)  
<https://doi.org/10.1134/S0010952515010098>
33. Ogilvie K., Chornay D., Fritzenreiter R. SWE, a comprehensive plasma instrument for the wind spacecraft // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. № 1–4. P. 55–77.  
<https://doi.org/10.1007/BF00751326>
34. Lin R.P., Anderson K.A., Ashford S. et al. A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the wind spacecraft // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 125–153.  
<https://doi.org/10.1007/BF00751328>
35. Lepping R.P., Acuna M.H., Burlaga L.F. et al. The WIND magnetic field investigation // Space Sci. Rev. 1995. V. 71. P. 207.  
<https://doi.org/10.1007/BF00751330>
36. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г. и др. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000 гг. // Космич. исслед. 2009. Т. 47. № 2. С. 99–113. (Cosmic Research. P. 81–94.)

УДК 52.724.52.726

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПЕКТР ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЖЕСТКОСТЕЙ ПО ДАННЫМ AMS-02

© 2021 г. В. Г. Янке<sup>1</sup>, \*, А. В. Белов<sup>1</sup>, Н. С. Шлык<sup>1</sup>, П. Г. Кобелев<sup>1</sup>, Л. А. Трефилова<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

\*yanke@izmiran.ru

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Вся достоверная информация о долговременных характеристиках межпланетной среды, таких как спектр вариаций, анизотропия и градиенты космических лучей была получена по данным наземной сети детекторов с момента ее создания. Но для решения обратной задачи требовалось знание формы спектра вариаций, который до настоящего времени задавался только эмпирически. В настоящей работе изучен и экспериментально определен спектр вариаций протонов и ядер гелия на основе прецизионных измерений потоков частиц до жесткостей 60 ГВ за пределами атмосферы на магнитном спектрометре AMS-02, а также установлена трансформация вида этого спектра при переполносовке магнитного поля Солнца. Найденный вид спектра вариаций космических лучей позволит увеличить точность восстанавливаемых параметров спектра вариаций и составит прочную основу для дальнейших исследований модуляционных эффектов в гелиосфере и связанных с ними приложений.

DOI: 10.31857/S002342062106011X

### ВВЕДЕНИЕ

Астрофизика исследует спектры частиц [1] как источник информации об объектах, где произошло их рождение и распространение в зависимости, например, от состава космического излучения. Возможные временные изменения в гелиосфере рассматриваются как искажающий фактор. Солнечно-земная физика [2], напротив, рассматривает спектры частиц на границе гелиосферы как граничные условия и исследует обусловленные деятельностью Солнца временные изменения в гелиосфере. В этом случае удобно рассматривать спектр вариаций, т.е. изменения потока частиц, которые будут определяться модулирующей способностью частиц различной жесткости. Спектр вариаций не зависит от спектра частиц, хотя последний лежит в его основе, поскольку рассматриваются изменения спектра частиц  $J(R)$  относительно базового момента времени  $J_B(R)$ , т.е.

$$\delta J/J = (J - J_B)/J_B. \quad (1)$$

Восстановление спектра вариаций (формы спектра или параметров его аппроксимации) является главной целью при решении обратной задачи по данным сети наземных детекторов космических лучей.

Действительно, обратная задача может быть представлена интегральным уравнением Фред-

гольма 1-го рода, когда наблюдаемые вариации  $v_i = \delta N^i/N^i$  позволяют судить о причинах изменений спектра вариаций  $\delta J/J_B$ , их породивших

$$v^i = \int_{R_c^i}^{\infty} W^i(R) \delta J/J_B dR. \quad (2)$$

Здесь в качестве аппаратной функции интегрального уравнения выступает функция связи  $W^i(R)$  [3, 4] первичных и вторичных вариаций космических лучей для  $i$ -го детектора, а  $R_c^i$  жесткость геомагнитного обрезания. Важной является ситуация, когда аналитическая форма искомого решения  $\delta J/J_B$  известна. В этом случае размерность задачи может быть существенно уменьшена и, как правило, соответствующая система уравнений для нахождения небольшого числа неизвестных параметров оказывается хорошо обусловленной. Существенным преимуществом этого подхода является то, что практически никогда нельзя получить абсурдного решения, если аналитическая модель выбрана в соответствии с исследуемым процессом.

Вид спектра вариаций  $\delta J/J_B$  до настоящего момента определялся только эмпирически. Прямой экспериментальной проверки вида спектра

вариаций, тем более, до жесткостей в несколько десятков ГВ никогда не проводилось, поскольку максимальные жесткости частиц в прямых измерениях в лучшем случае достигали 2 ГВ и, кроме того, отсутствовали продолжительные измерения.

Сегодня решить эту задачу позволяют магнитные спектрометры PAMELA [5], AMS-02 [1] и баллонные стратосферные измерения [6], правда, в последнем случае из-за дискретности пусков возникают сложности с выбором базового периода. Но наиболее точное решение – это прямые измерения в широком диапазоне жесткостей с помощью уникального магнитного спектрометра AMS-02. Для независимой экспериментальной проверки необходимы прецизионные измерения потоков частиц до жесткостей 60 ГВ за пределами атмосферы в диапазоне чувствительности нейтронных мониторов и мюонных телескопов. Такие измерения на протяжении цикла солнечной активности впервые были выполнены на прецизионном магнитном спектрометре AMS-02, по данным которого были получены экспериментальные спектры вариаций космических лучей.

Задача настоящей работы – по экспериментальным данным AMS-02 о спектре протонов и ядер гелия в диапазоне жесткостей от 1 до 60 ГВ и их временных изменениях установить аналитическую форму спектра вариаций с минимальным числом параметров для использования при анализе данных мониторинга мировой сети детекторов космических лучей. Это позволит отказаться от эмпирически задаваемых спектров вариаций.

### ДАнные МАГНИТНОГО СПЕКТРОМЕТРА AMS-02

Уникальную возможность измерения спектральных характеристик при умеренных и высоких жесткостях дают высокоточные данные орбитального детектора космических лучей AMS-02 [7]. Геометрический фактор магнитного спектрометра AMS-02 около  $0.5 \text{ m}^2 \text{ sr}$ , что обеспечивает статистическую точность 1.5%. Данные описаны в работе [8] и доступны в базе данных [9] для 79 каррингтоновских оборотов для широкого диапазона жесткостей 1–60 ГВ. Сравнение временной зависимости потока протонов с результатами анализа наземных измерений для жесткости 10 ГВ можно найти в работе [10].

### МЕТОД GSM И СПЕКТР ВАРИАЦИЙ

Экспериментальные данные об изменениях потока космических лучей за период с середины 50-х гг. по настоящее время с хорошей точностью могли быть получены только по непрерывным наземным измерениям на сети детекторов космических лучей. Необходимость анализа результатов такого длительного наземного мониторинга

привела к созданию особых методов. Один из первых и при этом наиболее успешно реализованный глобально спектрографический метод (GSM) был создан в работах [11, 12].

В работе [13] был разработан вариант такого метода, специально приспособленный для изучения долговременных вариаций в приближении изотропных вариаций. Анализ проводится по среднемесячным данным ~50 нейтронных мониторов, мюонных телескопов и по данным стратосферного зондирования. В простейшем случае изотропных вариаций задача сводится к решению системы уравнений (1), требующей знания спектра вариаций космических лучей.

В модели используется трехпараметрический вид спектра вариаций:

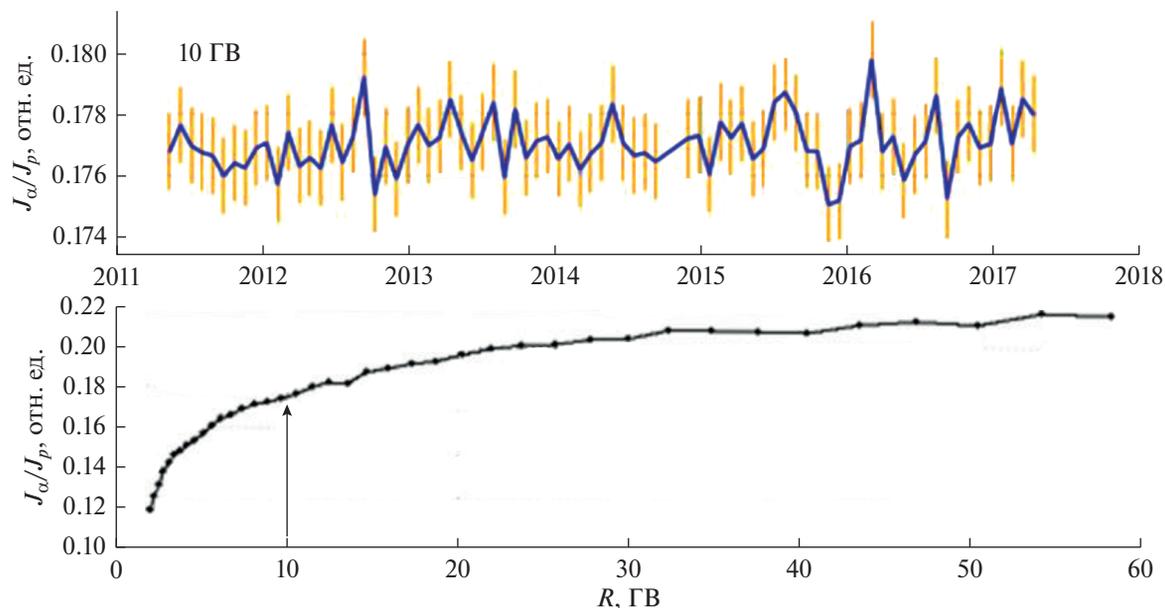
$$\delta J/J_B = a_1(R_L + R)^{-\gamma}, \quad (3)$$

где  $J_B$  относится к базовому периоду. Вид спектра вариаций в форме (3) выбран эмпирически, при этом рассматривались и другие варианты.

Астрофизики рассматривают несколько форм представления спектров частиц. Так в работе [1] для жесткостей, когда существенна солнечная модуляция, спектры частиц различного типа, измеряемых на AMS-02, аппроксимируются степенной функцией с переменным спектральным индексом. Очень удобно однопараметрическое представление спектра, где в качестве параметра используется потенциал модуляции [14, 15]. Эта функция описывает форму спектра частиц с помощью одного (зависящего от времени) параметра потенциала модуляции. Часто, особенно для солнечных космических лучей, привлекается степенной спектр частиц с сильным экспоненциальным затуханием в области верхних энергий [16–18]. Как ниже установлено, именно такой вид спектра (4) наиболее хорошо описывает спектр вариаций в нужном диапазоне жесткостей.

### ОЦЕНКИ СПЕКТРА ВАРИАЦИЙ

В данной работе мы рассматривали спектр вариаций для протонов и ядер гелия. Для жесткости 10 ГВ по данным AMS-02 отношение нуклонов ядер гелия к протонам галактических космических лучей  $\alpha/p = 0.177 \pm 0.001$  за весь рассматриваемый период с мая 2011 по апрель 2017 г. (рис. 1), что соответствует вкладу ядер гелия ~4.5%. По данным AMS-02 получено также некоторое увеличение доли ядер гелия с ростом энергий, например, для временного интервала 11.I–7.II.2014 такая зависимость показана на рис. 1 (нижняя панель). Аналогичная зависимость для отношения  $p/\text{He}$  была ранее получена в эксперименте PAMELA [19]. Вклад ядер гелия важно всегда учитывать, поскольку при анализе GSM используются реальные функции связи, полученные эксперимен-



**Рис. 1.** Временные изменения отношения  $\alpha/p$  для жесткости 10 ГВ/нуклон (верхняя панель) и зависимость отношения  $\alpha/p$  от жесткости частиц для оборота 11.I–7.II.2014 (нижняя панель).

тально в широтных измерениях или расчетным путем с учетом вклада ядер гелия.

Временные зависимости вариаций потока альфа частиц и протонов показаны на рис. 2, которые, как и следовало ожидать, практически не отличаются. Для сравнения приведены также временные изменения вариаций электронов и протонов. За базовый период взяты пять Каррингтоновских оборотов начала 2017 г. Для протонов и ядер гелия жесткость равна 10.55 ГВ/нуклон, для релятивистских электронов и позитронов временной ход приведен для 10.65 ГэВ. Данные из базы данных [9].

Для ядер гелия и протонов тестировались несколько видов спектров [16–18], но наиболее удачным для аппроксимации экспериментального спектра вариаций в широком диапазоне жесткостей оказался степенной спектр, модулированный экспонентой в области верхних жесткостей, т.е.

$$v = a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H). \quad (4)$$

Результат аппроксимации и параметры аппроксимации  $a_1$ ,  $\gamma$ , и  $R_H$  для двух моментов времени приведены на рис. 3.

Методику оценки спектров вариаций протонов и ядер гелия иллюстрирует рис. 3 для периода отрицательной полярности (слева) и положительной полярности (справа). На верхних панелях сравниваются вариации, найденные GSM и измеренные AMS–02 до и после переполюсовки в 2014 г., а вертикальными отрезками отмечены моменты времени для которых спектры вариаций приведены на нижних панелях. Для каждого слу-

чая показаны параметры аппроксимации спектра вариаций и среднеквадратичная ошибка модели  $\sigma(\%)$ . Вклад [20] солнечных космических лучей SPE и GLE незначителен, но вклад, тем не менее, исключен при формировании потока для требуемых каррингтоновских оборотов авторами данных [7].

Для каждого каррингтоновского оборота определяются изменения спектра частиц  $J$  относительно спектра частиц в базовый период  $J_B$  (январь–апрель 2017 г., горизонтальный отрезок на верхней панели) и вычисляется спектр вариаций, как  $v = (J - J_B)/J_B$ . На средней панели рис. 3 приведен спектр вариаций для протонов, а на нижней панели спектр вариаций для нуклонов гелия (точки и их ошибки определения).

Как отмечалось, наиболее удачным для аппроксимации экспериментального спектра вариаций частиц в широком диапазоне жесткостей оказался степенной спектр, модулированный экспонентой в области верхних жесткостей (4), который линейаризуется логарифмированием.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

К настоящему моменту было проведено несколько исследований по установлению функциональной зависимости спектра модуляции и его трансформации в различные периоды СА и полярности магнитного поля. В первую очередь следует отметить цикл работ [21–23]. Анализ опирался на данные нейтронных мониторов, наблюдения заряженной компоненты в верхней атмосфере и дан-

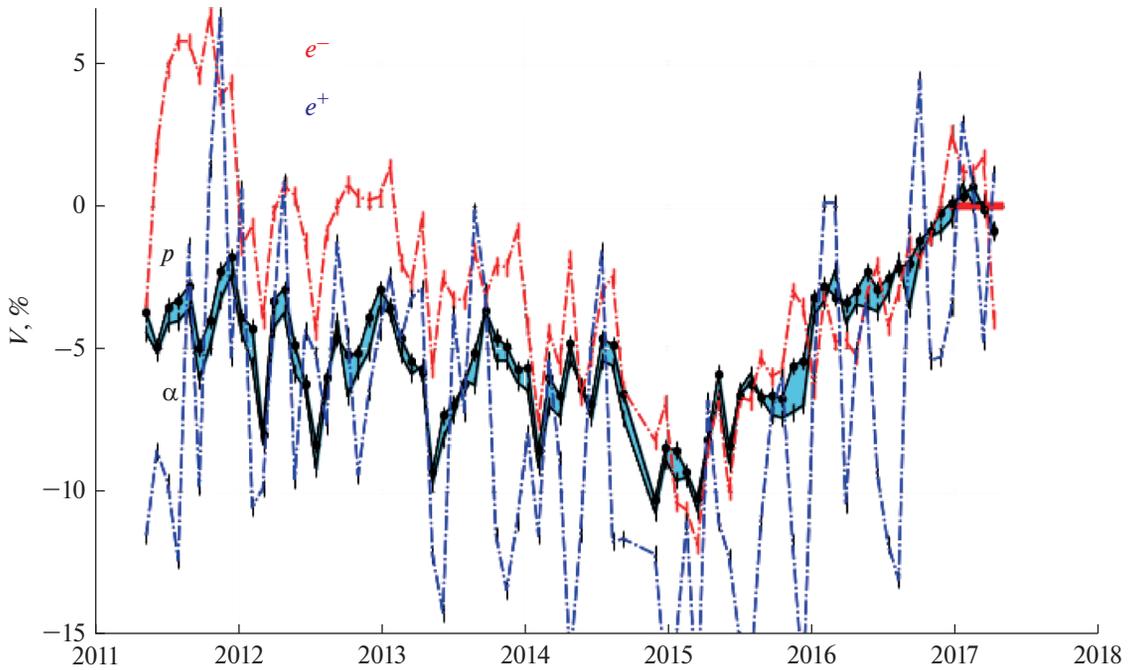


Рис. 2

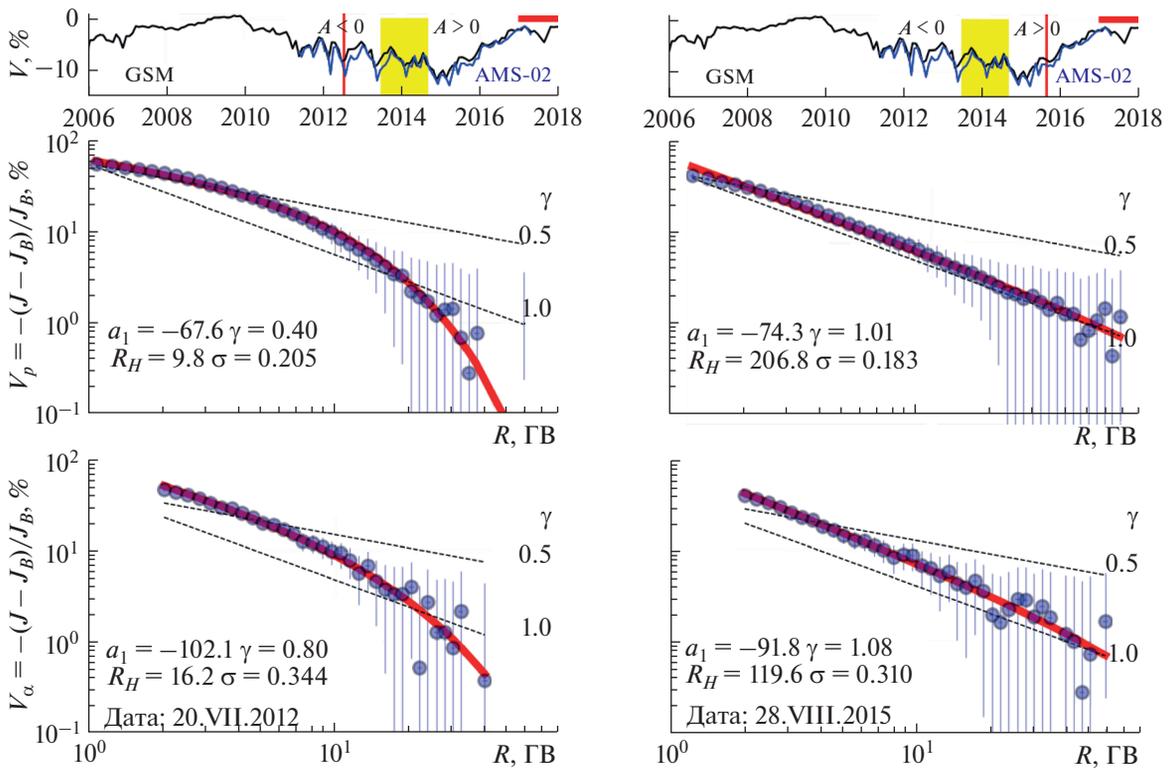


Рис. 3

ные космических аппаратов. В работе [22] в диапазоне 0.6–100 ГВ обсуждается зависимость спектра вариаций от полярности межпланетного поля, но она достаточно слабо выражена. Действительно, для периода 1987–1990 год и  $A < 0$  по-

казатель степенного спектра равен 1.02, а для периода 1977–1981 г. и  $A > 0$  показатель степенного спектра равен 1.22.

В работе [24] обсуждается зависимость спектра вариаций космических лучей от эпохи СА. По

данным сети нейтронных мониторов авторами был установлен степенной вид спектра вариаций с показателем в диапазоне от 0.6 до 1.2 для минимума и максимума солнечной активности, что дает, как нам сегодня представляется, слишком мягкий спектр вариаций. Авторы работы изменения спектра вариаций связывают с турбулентностью межпланетной среды, а не с дрейфовыми эффектами. Они полагают, что  $\sim 70\text{--}80\%$  амплитуды 11-летних вариаций интенсивности галактических космических лучей обусловлена изменениями турбулентности межпланетного магнитного поля.

Параметры аппроксимации рассматриваемой модели получены для каждого оборота с мая 2011 для протонов и ядер гелия. Установленная форма спектра вариаций (4) принципиально отличается от (3), использованной нами ранее при реализации метода GSM. Причем спектр вариаций (3) подавляет вариации в области нижних жесткостей, а спектр вариаций (4), напротив, — в области верхних жесткостей, чем управляет параметр  $R_H$ . Качество фитирования этими функциями контролировалось среднеквадратичной ошибкой модели, которая приводится для каждого интервала. Отсюда нужно сделать вывод, что с учетом найденного вида спектра вариаций (4) следует пересмотреть результаты GSM для изотропных вариаций.

Важным результатом работы является трансформация вида спектра вариаций в разные периоды полярности межпланетного магнитного поля, причем такая трансформация одинакова для протонов и ядер гелия. В период отрицательной полярности магнитного поля Солнца до переполюсовки параметр  $R_H$  близок к 10 ГВ. Это означает, что наблюдается степенной спектр вариаций галактических космических лучей с сильным экспоненциальным затуханием. При смене полярности и начале нового 24-го солнечного цикла параметр  $R_H$  близок к 100 ГВ и спектр вариаций переходит в чисто степенной, что также отмечалось в [21]. На рис. 3 приведены по два случая до и после переполюсовки магнитного поля Солнца. За весь период работы AMS-02 анимацию можно найти на ресурсе [25].

В периоды положительной магнитной полярности, положительно заряженные частицы попадают в гелиосферу из полярных областей, дрейфуют к экватору и уходят из гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя. При дрейфе от полюса к экватору частицы теряют энергию, соответствующую разности потенциалов гелиосферы  $\Phi$ . Так как потенциал гелиосферы  $\Phi$  слабо зависит от возмущенности магнитного поля, в минимуме солнечной активности максимум амплитуды изотропной вариации плоский. Интенсивность вариаций пропорциональна  $\Delta\Phi/R$  [23], т.е. показатель  $\gamma \approx 1$ , что и наблюдается. При отрицательной полярности в приближении слабой модуляции

(т.е. высоких энергий) частицы дрейфуют из внешней гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя и через полярные области покидают гелиосферу. Таким образом, модуляция частиц определяется только потерями энергии при распространении в экваториальной области, определяемыми длиной свободного пробега частиц. То есть наблюдаемый на Земле спектр частиц хорошо коррелирует с уровнем возмущенности магнитного поля, поэтому в минимуме солнечной активности максимум острый. Для высоких энергий пробег  $\lambda \sim p^2$  [26] и показатель  $\gamma \approx 2$ , что также экспериментально наблюдается при жесткости  $\sim 10$  ГВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За весь рассматриваемый период мониторинга, благодаря своим уникальным возможностям, магнитный спектрометр AMS-02 впервые позволил получить экспериментальный спектр вариаций космических лучей в диапазоне жесткостей  $\sim 1\text{--}60$  ГВ к которым чувствительна наземная сеть нейтронных мониторов и мюонных телескопов. Это, в свою очередь, позволило снять неопределенность в выборе спектра вариаций космических лучей при решении обратной задачи для восстановления его параметров за пределами магнитосферы, поскольку до настоящего момента спектр вариаций космических лучей определялся только эмпирически.

Важно учесть состав космических лучей. По данным AMS-02 за весь период измерений для жесткости 10 ГВ отношение  $\alpha/p$  постоянно и равно  $17.7 \pm 0.1\%$ . Вклад ядер гелия незначительно ( $\sim 10\%$ ) увеличивается с жесткостью для диапазона жесткостей 5–20 ГВ.

Установлена трансформация формы спектра для протонов и ядер гелия. В период отрицательной полярности магнитного поля Солнца и до переполюсовки наблюдается степенной спектр вариаций галактических космических лучей с сильным экспоненциальным затуханием в области верхних жесткостей. При смене полярности, после переполюсовки магнитного поля Солнца, спектр вариаций переходит в чисто степенной спектр.

Найденный вид спектра вариаций космических лучей позволит увеличить точность восстанавливаемых параметров спектра вариаций за пределами магнитосферы по данным сети наземных детекторов и составит прочную основу для дальнейших исследований модуляционных эффектов в гелиосфере, а также связанных с ними приложений.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ “Сеть СКЛ”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aguilar M. et al.* The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years // *Physics Reports*. 2021. V. 894. P. 1–116. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.09.003> <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157320303434?via%3Dihub>
2. *Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G.* Contributions from Changes in Various Solar Indices in Cycles 20–23 and 24 to the Modulation of Cosmic Rays // *Bulletin RAS: Physics*. 2017. V. 81. № 2. P. 146–150. <https://doi.org/10.3103/S1062873817020101>
3. *Александрьян Т.М., Белов А.В., Янке В.Г. и др.* Экспериментальные исследования геомагнитных эффектов в космических лучах и спектр эффекта возмущения перед магнитными бурями // *Изв. РАН*. 1982. Т. 46. № 9. С. 1689–1691.
4. *Fujimoto K., Murakami K., Kondo I., Nagashima K.* Approximate Formula for Response Function for Cosmic Ray Hard Component at Various Depths of the Atmospheric and Underground // *Proc. of 15th ICRC, Budapest, Hungarian*. 1977. V. 4. P. 321. <http://adsabs.harvard.edu/full/1977ICRC....4..321F>
5. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* (PAMELA Collaboration) Ten years of PAMELA in space // *Riv. Nuovo Cimento*. 2017. V. 40. P. 473. <https://doi.org/10.1393/ncr/i2017-10140-x>
6. Balloons, 2021, Stratospheric balloons. Chronological lists of launches worldwide since 1947. <https://stratocat.com.ar/globos/indexe.html>
7. *Aguilar M. et al.* Observation of Fine Time Structures in the Cosmic Proton and Helium Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121. P. 051101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.051101>
8. *DiFelice V., Pizzolotto C., D'Urso D. et al.* Looking for cosmic ray data? The ASI Cosmic Ray Database // 35th ICRC. PoS 1073. Korea. 2017. <https://pos.sissa.it/301/1073/pdf>
9. CRDB, 2021. <https://tools.ssd.csi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp> (last accessed July 12, 2021)
10. *Белов А.В., Гущина Р.Т., Шлык Н.С., Янке В.Г.* Сравнение долговременных изменений потока космических лучей по данным сети наземных детекторов PAMELA и AMS-02 // *Изв. РАН*. 2021. Т. 85. № 7. С. 100–104. <https://doi.org/10.1134/S0367676519000000>
11. *Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И. и др.* Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов // *Геомагн. и аэроном.* 1966. Т. 6. № 6. С. 991–996.
12. *Nagashima K.* Three Dimension Anisotropy in Interplanetary Space. Part I. Formulation of Cosmic Ray Daily Variation produced by Axis-Symmetric Anisotropy // *Rep. of Ionosphere and Space Res.* 1971. V. 25. № 3. P. 189.
13. *Белов А.В., Гущина Р.Т., Янке В.Г.* Долговременные вариации космических лучей: Спектр жесткости // *Геомагн. и аэроном.* 1998. Т. 38. № 4. С. 131.
14. *Gleeson L.J., Axford W.I.* Solar modulation of galactic cosmic rays // *ApJ*. 1968. V. 154. P. 1011.
15. *Vainio R., Desorgher L., Heynderickx D. et al.* Dynamics of the Earth's particle radiation environment // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 147. P. 187–231. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9496-7>
16. *Ellison D.C., Ramaty R.* Shock acceleration of electrons and ions in solar flares // *Astrophys. J.* 1985. V. 298. P. 400–408. <https://doi.org/10.1086/163623>
17. *Bruno A., Bazilevskaya G.A., Boezio M. et al.* Solar energetic particle events observed by the Pamela mission // *Astrophys. J.* 2018. V. 862. № 97. arXiv:1807.10183v1. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacc26>
18. *Koldobskiy S., Raukunen O., Vainio R. et al.* New reconstruction of event-integrated spectra (spectral fluences) for major solar energetic particle events // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. V. 647. arXiv:2101.10234v1.
19. *Adriani O. et al.* PAMELA Measurements of Cosmic-ray Proton and Helium Spectra // *Science*. 2011. V. 332. P. 69–72. <https://doi.org/10.1126/science.1199172>
20. *Ишков В.Н.* Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // *Геомагн. и аэроном.* 2018. Т. 58. № 6. С. 785–800. <https://doi.org/10.1134/S0016794018060056>
21. *Lockwood J.A., Webber W.R.* The 11-year solar modulation of cosmic rays as deduced from NM and direct measurements at low energies // *J. Geophys. Res.* 1967. V. 72. P. 5977. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/JZ072i023p05977>
22. *Lockwood J.A., Webber W.R.* Comparison of the rigidity dependence of the 11-year cosmic ray variation at the earth in two solar cycles of opposite magnetic polarity // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № A10. P. 21573–21580. <https://doi.org/10.1029/96JA01821>
23. *Lockwood J.A., Webber W.R.* The long-term variation of the cosmic radiation // *Canadian J. Physics*. 2011. V. 46. № 10. <https://doi.org/10.1139/p68-379>
24. *Alania M.V., Iskra K., Siluszyk M.* New index of longterm variations of galactic cosmic ray intensity // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. № 2. P. 267–274.
25. Variation Spectrum (last accessed July 12, 2021). [http://cosrays.izmiran.ru/dbs/LTV/VariationSpectrum/Animation\\_Spectrum\\_p1/Animation\\_Spectra\\_2017\\_Fast.gif](http://cosrays.izmiran.ru/dbs/LTV/VariationSpectrum/Animation_Spectrum_p1/Animation_Spectra_2017_Fast.gif)
26. *Топтыгин И.Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 1983.
27. *Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т. и др.* Экспериментальный спектр вариаций космических лучей на орбите земли по данным AMS-02 // *Известия РАН*. 2021. Т. 85. № 9. С. 1350–1353. <https://doi.org/10.31857/S0367676521090349>

УДК 537.591.5

## ДИНАМИКА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В СЕНТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2020 ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ *МЕТЕОР-М* И *ЭЛЕКТРО-Л*

© 2021 г. И. Н. Мягова<sup>1</sup>\*, А. В. Богомолов<sup>1</sup>, В. Е. Еремеев<sup>1</sup>, А. О. Ширяев<sup>1,2</sup>, Е. А. Гинзбург<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>3</sup>Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

\*irina@sdr.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 01.03.2021 г.

После доработки 12.05.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Представлены результаты сравнительного анализа данных российских спутников по радиационной обстановке в околоземном пространстве в течение сентября–ноября 2020 г. Источником вариаций потоков и спектров электронов внешнего радиационного пояса Земли в это период являлись высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональной дыры. Обсуждаются различия реакции внешнего радиационного пояса Земли на рекуррентные геомагнитные возмущения на каждом из оборотов Солнца.

DOI: 10.31857/S0023420621060078

### ВВЕДЕНИЕ

Основное влияние на динамику радиационных условий в околоземном космическом пространстве (ОКП) в периоды минимума солнечной активности (СА) оказывают частицы внешнего радиационного пояса Земли (ВРПЗ) – захваченные магнитным полем Земли электроны релятивистских и субрелятивистских энергий. Это обусловлено тем, что основной источник другой популяции, представляющей радиационную опасность в ОКП – солнечных космических лучей – связан с солнечными вспышками, которые в минимуме солнечной активности отсутствуют. Поэтому в периоды минимумов СА потоки электронов ВРПЗ определяют радиационные условия в ОКП, в т. ч. на геостационарных орбитах. Релятивистские электроны могут негативно влиять на работу спутников, поскольку высокие уровни потоков релятивистских электронов с большой вероятностью повреждают чувствительные электронные компоненты спутников [1–4]. Причем в условиях дальнейшей миниатюризации электроники на КА негативное влияние РЭ будет только возрастать. Оперативный мониторинг радиационных условий и прогнозирование радиационного состояния ОКП позволяют предупредить опасные последствия изменений в радиационной обстановке [5]. Следовательно, новые экспериментальные данные о динамике радиаци-

онных условий на разных орбитах представляют не только научный, но и практический интерес.

Как известно, потоки электронов ВРПЗ чувствительны к геомагнитным возмущениям вне зависимости от их природы. Источниками возмущений могут быть как корональные выбросы массы (КВМ), связанные с солнечными вспышками, так и высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП СВ) [6]. В период минимума СА более актуальными становятся магнитные бури, вызванные ВСП СВ из корональных дыр (КД). Из многочисленных экспериментов известно, что в большинстве случаев на главной фазе магнитной бури происходит резкое падение потоков релятивистских электронов ВРПЗ, вплоть до полного исчезновения [7]. Затем примерно в половине случаев бурь потоки возрастают до уровня выше добуревого, иногда на несколько порядков, примерно в одной четверти случаев восстанавливаются до добуревого уровня, в оставшейся четверти случаев – восстанавливаются не полностью, оставаясь на уровне ниже добуревого [8–10].

Целью данной работы является сравнительный анализ данных российских КА, находящихся на геостационарной и круговых полярных орбитах, полученных во второй половине 2020 г. Исследовались вариации потоков электронов ВРПЗ, происходившие с сентября по ноябрь 2020 г. в результате рекуррентных геомагнитных возмуще-

**Таблица 1.** Состав измерений потоков заряженных частиц, пороговые энергии или диапазоны энергий, космические аппараты

	Зарядовые составляющие	Энергии, МэВ		Спутник
		электроны	протоны	
1	Электроны + протоны	>0.15	>5	<i>Метеор-М № 2</i> , <i>Метеор-М № 2-2</i>
2		>0.7	>15	
3		>1.7	>25	
4	Электроны + протоны	>0.1	0.8–1	<i>Метеор-М № 2</i>
5	Электроны	>0.3	–	
6	Электроны	>2	–	
7	Электроны + протоны	>0.6	>1.6	<i>Электро-Л № 2</i>
8	Электроны	>2	–	<i>GOES16</i>

ний, вызванных, в свою очередь, воздействием высокоскоростного потока солнечного ветра из северной корональной дыры в течение трех оборотов Солнца. Также рассматривалась способность российской группировки КА, имеющих разные орбиты, обеспечивать надежный мониторинг радиационной обстановки в ОКП.

#### ИСТОЧНИКИ И СОСТАВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В настоящей работе использовались данные о потоках электронов с низкоорбитальных метеорологических спутников РФ *Метеор-М № 2* (запущен 8.VII.2014) и *Метеор-М № 2-2* (запущен 5.VII.2019), а также геостационарных спутников *GOES16* (США, запущен 19.XI.2016) и *Электро-Л № 2* (РФ, запущен 11.XII.2015).

Орбиты спутников *Метеор-М № 2* и *Метеор-М № 2-2* солнечно-синхронные, высота в восходящем узле  $h = 832$  км, наклонение  $i \sim 98.8^\circ$ , период обращения  $T = 101.3$  мин, орбита *Электро-Л № 2* — точка стояния  $76^\circ$  в.д., с сентября 2020 —  $14.5^\circ$  з.д., высота орбиты — 36000 км, наклонение — не более  $0.5^\circ$ .

Электроны релятивистских и субрелятивистских электронов регистрировались с помощью гейгеровских счетчиков (пороговые энергии 0.7 и 1.7 МэВ), и телескопической сборки из полупроводниковых и сцинтилляционного детекторов (пороговые энергии 100, 300 и 700 кэВ). На спутниках *Метеор-М № 2* было установлено два набора телескопов с углами обзора в  $30^\circ$  — по вектору скорости спутника (ось  $X$  спутника) и в перпендикулярном направлении в сторону открытого космоса (ось  $Z$ ). На средних широтах, близких к положению широты максимума внешнего пояса, направление осей телескопов занимают промежуточное положение между направлением вдоль силовой линии и нормалью к ней. Тем не менее, направление оси  $X$  ближе к направлению нормали к силовой линии, чем направление оси  $Z$ . Поэтому, с учетом относительно узкого угла обзора, телескоп вдоль оси  $X$  регистрирует захва-

ченные частицы. Поэтому в данной работе мы использовали показания телескопа, смотрящего по оси  $X$ .

Основные измерительные характеристики использованных приборов приведены в табл. 1.

#### ИСТОЧНИКИ ВОЗМУЩЕНИЙ И УСЛОВИЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Как уже было сказано выше, процессы, происходящие в ОКП магнитосфере Земли, тесно связаны между собою, что делает необходимым рассмотрение условий, в которых осуществлялись наблюдения, а также источников вариаций потоков электронов ВРПЗ.

На рис. 1 приведены временные зависимости наиболее существенных параметров, влияющих на вариации потоков электронов внешнего радиационного пояса (ВРПЗ) — модуль  $B$  и  $B_z$ -компоненты вектора магнитной индукции межпланетного магнитного поля (ММП), а также плотности и скорости солнечного ветра в период с сентября по ноябрь 2020. Как можно заметить, в указанный период времени трижды регистрировались высокоскоростные потоки солнечного ветра (ВСП СВ). Источником этих возрастаний стала квазистационарная северная корональная дыра, наблюдавшаяся на Солнце с августа по декабрь 2020. Также из рис. 1 видно, что скорость ВСП СВ во всех трех возрастаниях не превышает 700 км/с, а отрицательное значение  $B_z$  держится не слишком долго, что заставляет ожидать небольшую амплитуду рекуррентных геомагнитных возмущений. Заштрихованные области — это рассматриваемые нами интервалы возмущений.

На верхней панели рис. 2 приведены временные зависимости геомагнитных индексов  $K_p$  и  $Dst$ , характеризующие рекуррентные возмущения, вызванных приходом к Земле ВСП СВ. Видно, что геомагнитное возмущение с максимальной амплитудой наблюдалось после сентябрьского возрастания скорости потока СВ, когда максимальная амплитуда  $Dst$ -вариации рав-

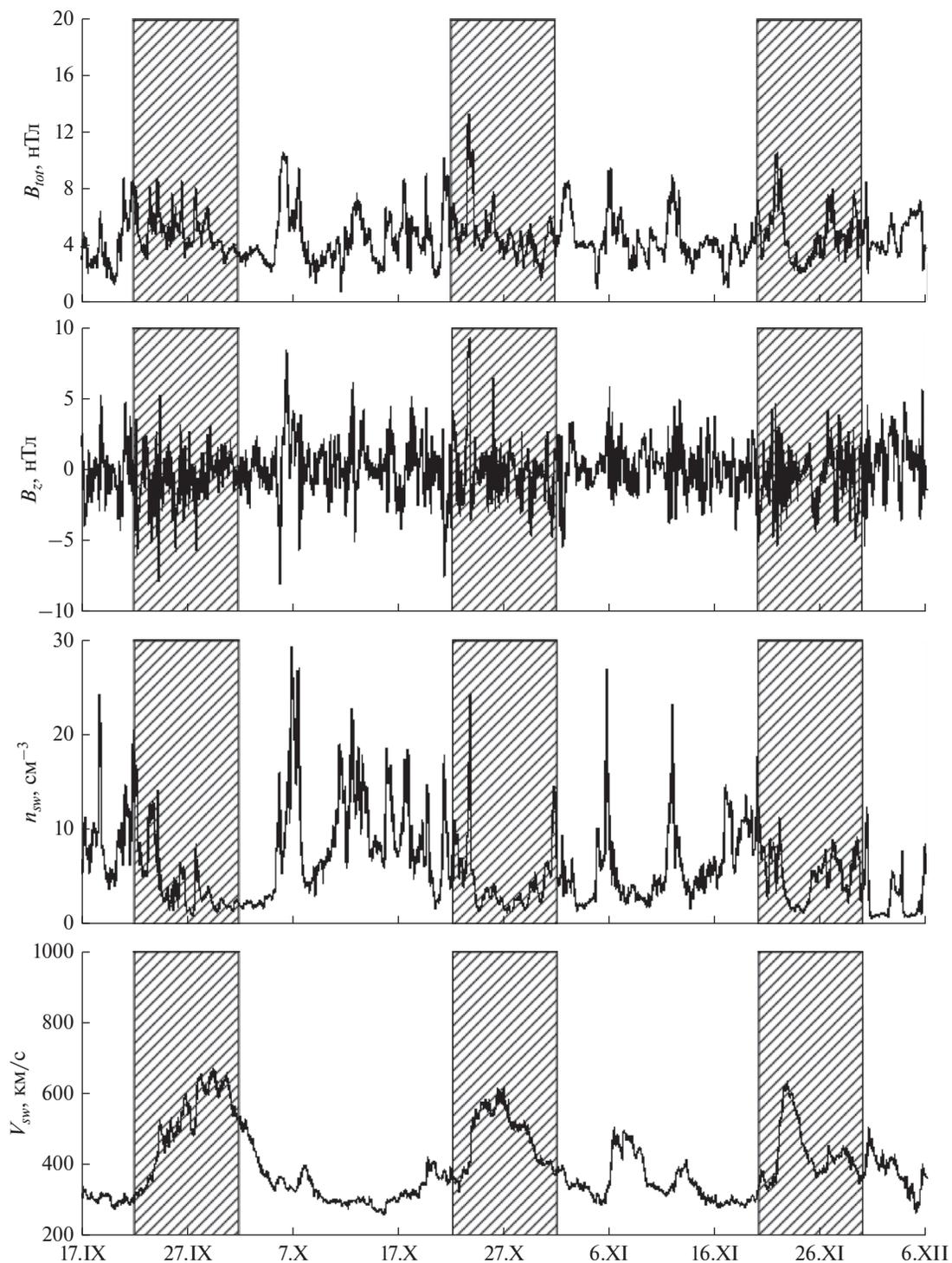


Рис. 1

нялась  $-57$  нТ, а  $Kp$ -индекс = 6-. Также видно, что во всех трех случаях, геомагнитные возмущения не имели единственной, четко выраженной главной фазы бури, а состояли из нескольких активаций. Мы предполагаем, что такой характер возмущений может быть связан со сложной про-

странственной структурой корональной дыры, являвшейся источником всех трех ВСП СВ.

Мы ограничились демонстрацией вариаций  $Dst$  и  $Kp$ -индекса, поскольку анализ буревых вариаций потоков электронов внешнего РПЗ выполнен на довольно грубой временной шкале —

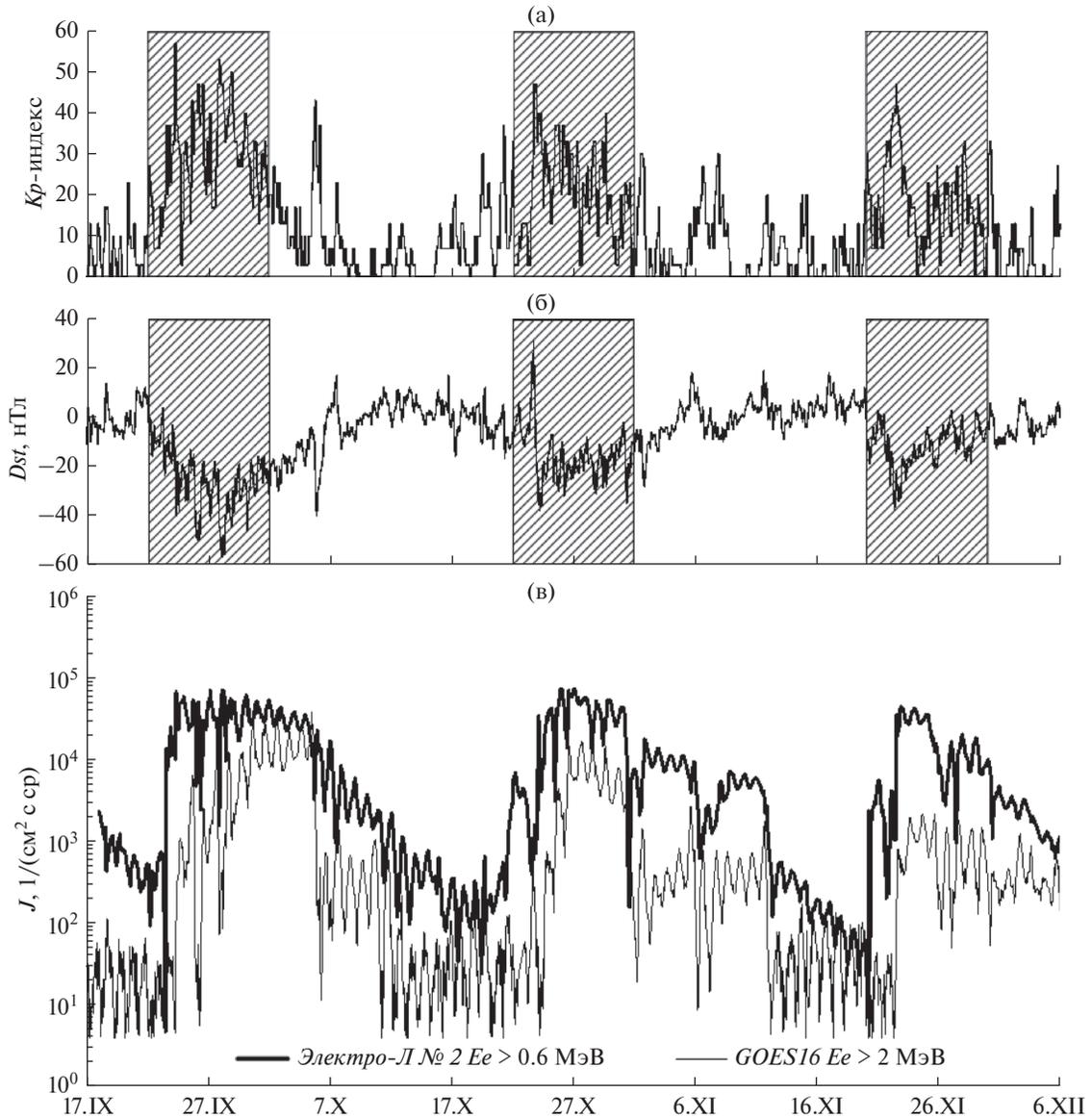


Рис. 2

несколько дней для каждого из трех событий. На этой временной шкале вариации  $Kp$  и авроральных индексов  $AE-AL$  носят сходный характер. Авроральные индексы может дать существенные результаты только при исследованиях мелко-масштабных вариаций потоков частиц (например, высыпаний) в областях близких ко внешней границе внешнего пояса, что планируется нами сделать в последующих работах.

На нижней панели рис. 2 представлен временной ход релятивистских и субрелятивистских электронов на геостационарной орбите по данным *GOES16* ( $>2$  МэВ) и *Электро-Л № 2* ( $>600$  кэВ).

На нижней панели рис. 2 хорошо видны три последовательных возрастания потоков электронов ВРПЗ. Также заметны их отличия — напри-

мер, что первое возрастание, вызванное более сильной магнитной бурей, привело к более интенсивному возрастанию потоков релятивистских электронов ( $>2$  МэВ). Также видно, что возрастания потоков электронов субрелятивистских энергий ( $>600$  кэВ) начинаются раньше, чем релятивистских, что отмечалось и в ранних работах [7, 11].

Потоки электронов субрелятивистских ( $>100$  кэВ) и релятивистских ( $>2$  МэВ) ВРПЗ, регистрировавшиеся в эксперименте на ИСЗ *Метеор-М № 2*, имевшим круговую полярную орбиту и за счет этого пересекавшие разные  $L$ -оболочки, представлены на рис. 3.

Рис. 3 отражает вариации не только интенсивности, которая показана цветом в полутонной

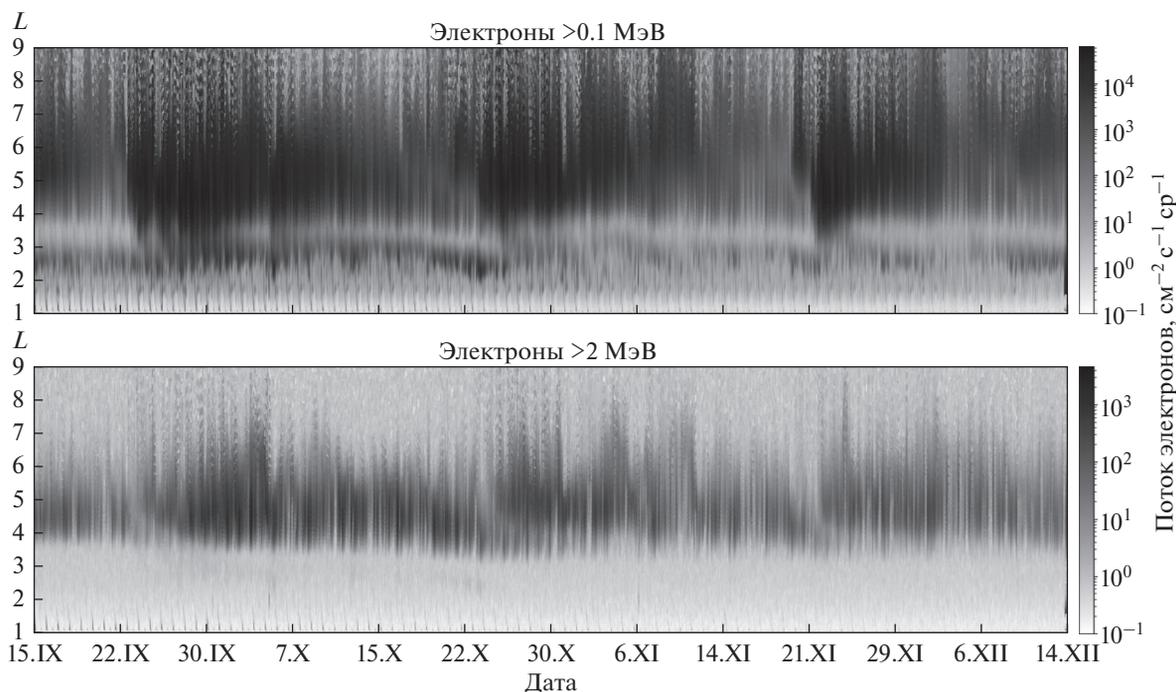


Рис. 3. Вариации потоков электронов субрелятивистских ( $>100$  кэВ) и релятивистских ( $>2$  МэВ) энергий ВРПЗ по данным ИСЗ *Meteo-p-M № 2* с 15.IX по 14.XII.

шкале, но и пространственного распределения частиц ВРПЗ разных энергий. Мы видим, что отмеченные выше для геостационарной орбиты более интенсивные и более длительные возрастания потоков электронов релятивистских энергий наблюдаются и на малых высотах.

Рассмотрим более подробно каждый из трех периодов геомагнитных возмущений.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВРПЗ НА МАЛЫХ ВЫСОТАХ

Как уже было сказано выше, из трех рассмотренных событий, сентябрьское было наиболее интенсивным. Поток высокоскоростного СВ вызвал умеренную геомагнитную бурю, которая в свою очередь привела к вариациям потоков электронов ВРПЗ. На верхней панели показаны вариации потоков релятивистских электронов ( $>2$  МэВ) вдоль орбиты *Meteo-p-M № 2*. На рисунке хорошо видно, как на фазе восстановления бури поток электронов с энергией  $>2$  МэВ постепенно возрастает на всех  $L$ -оболочках от 3 до 7, вплоть до 5.X, когда после небольшого возмущения ( $Kp = 4$ ) происходит резкое падение потока электронов не только на геостационарной орбите (см. рис. 2), но и на малых высотах.

На нижней панели рис. 4, показывающей временной ход геомагнитных индексов  $Dst$  и  $Kp$ , стрелками отмечены моменты времени, для которых далее на рис. 5 приведены профили — зависи-

мости от  $L$ -оболочки величин потоков электронов разных энергий, полученные для вечерних значений локального времени.

При построении профилей потоков электронов разных энергий фоновым считался профиль за 19.IX (толстая сплошная линия). Из рис. 5 видно, что максимумы пояса для электронов  $>700$  кэВ и  $>1.7$  МэВ наблюдались на  $L = 4.5$  и  $4.3$ , соответственно.

23.IX (тонкая сплошная линия) мы наблюдаем небольшое возрастание и сдвиг в область более высоких  $L$  пояса для электронов  $>150$  кэВ, небольшое падение потока  $>700$  кэВ-ных электронов и практически полное исчезновение пояса релятивистских электронов ( $>1.7$  МэВ), аналогично тому, как это наблюдалось в других экспериментах [7]. Для профилей 24.IX (частые точки) наблюдается рост и расширение пояса 150 кэВ-ных электронов, дальнейшее падение потоков 700 кэВ-ных в области старого максимума и начало формироваться новый максимум на  $L = 4.9$ .

Далее 25.IX (пунктирная линия) профиль пояса электронов с энергией  $>150$  кэВ изменился мало, рост потока частиц  $>700$  кэВ продолжился, и их новый максимум на  $L = 4.9$  расширился, у релятивистских электронов начал формироваться новый максимум также на  $L = 4.9$ . В данных по КА *Meteo-p-M № 2-2* имелся пропуск 26.IX, 27.IX и 28.IX, 29.IX.2020 (показано штрихпунктирной линией) мы наблюдаем существенное возраста-

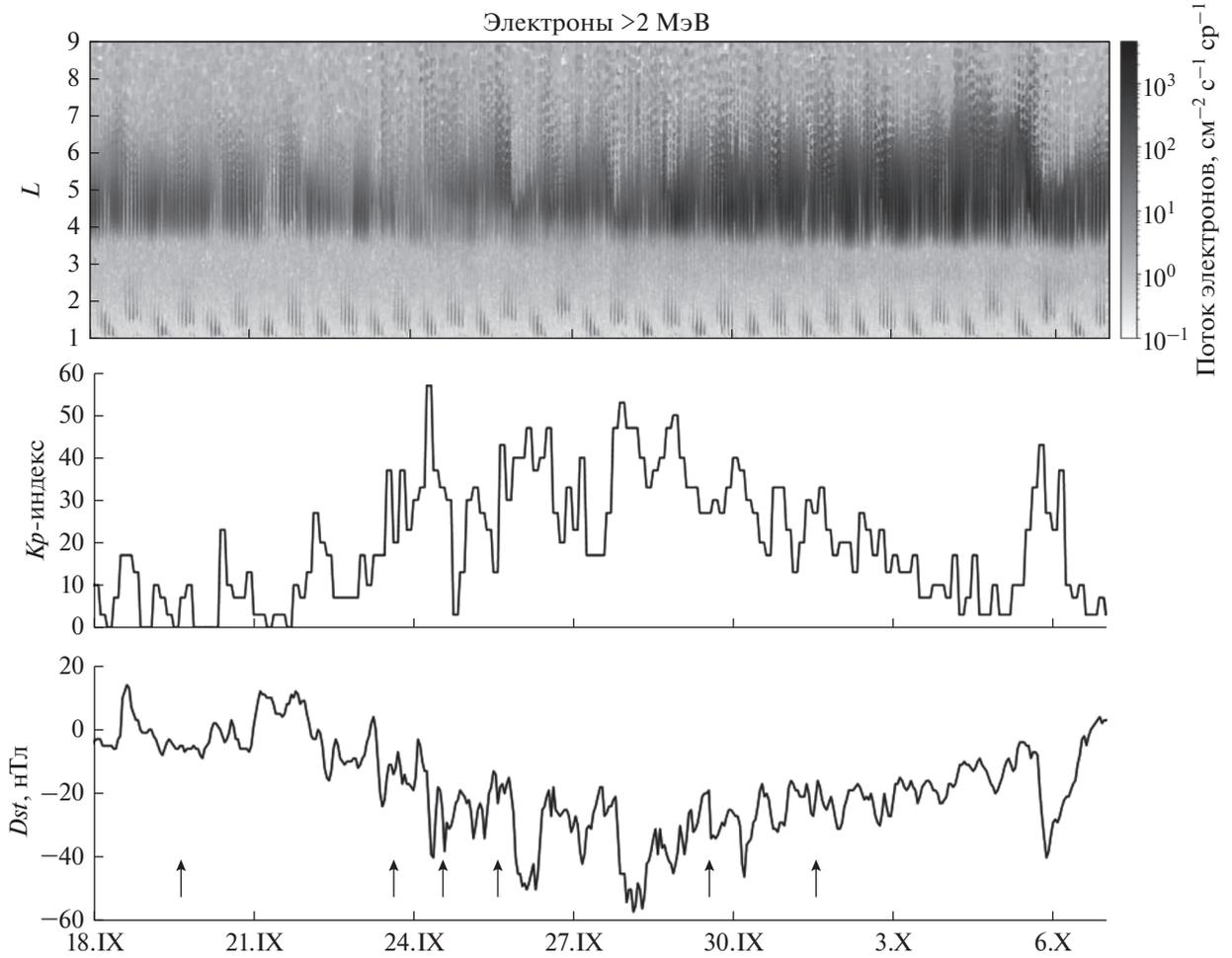


Рис. 4. Временные зависимости с 18.IX по 7.X потоков электронов релятивистских (>2 МэВ) энергий по данным ИСЗ Метеор-М № 2 (а), геомагнитных индексов Kp и Dst (б).

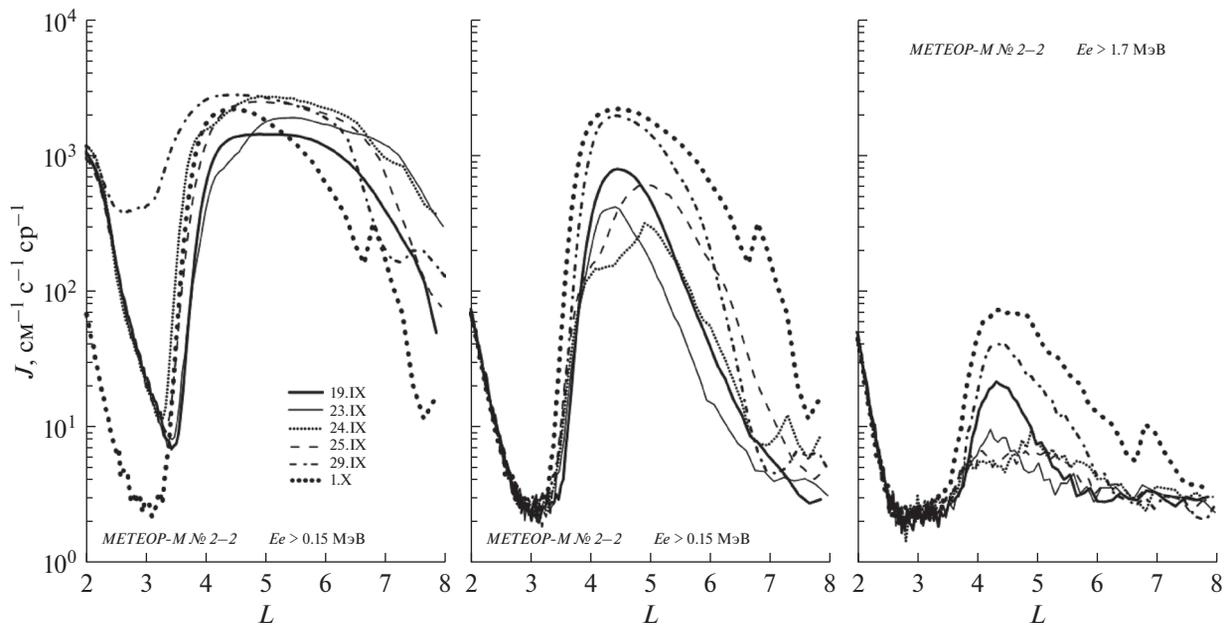


Рис. 5. Профили внешнего радиационного пояса для электронов >150 кэВ (а), >700 кэВ (б), >1.7 кэВ (в) во время геомагнитного возмущения 23–30.IX.

ние потоков  $>700$  кэВ-ных и  $>1.7$  МэВ-ных электронов, а также расширение области захваченной радиации по сравнению не только с состоянием 25.IX, но и с добуравым поясом. Интенсивность потока  $>150$  кэВ-ных электронов также возросла по сравнению с добуравым состоянием, заполнился зазор между поясами, полярная граница сдвинулась на более высокие  $L$ -оболочки. Профиль, полученных 1.X (жирные точки) показывает продолжающуюся тенденцию роста потоков электронов с энергией  $>0.7$  и  $>1.7$  МэВ и расширения области ВРПЗ. Кроме того, для обоих энергетических диапазонов видно возникновение дополнительного максимума вблизи  $L = 7$ . Поток электронов с энергией  $>150$  кэВ остается на уровне 29.IX. Поток электронов с энергией 1.7 МэВ остается высоким вплоть до 6.X, когда после краткого геомагнитного возмущения, вызванного скачком плотности СВ, он резко упал на геостационарной орбите на три порядка (см. нижнюю панель рис. 2), тогда как поток субрелятивистских электронов плавно снижался вплоть до прихода ВСП СВ на следующем обороте Солнца. Отдельно следует отметить дополнительное возрастание потоков электронов на  $L = 7$ , зафиксированное во всех трех энергетических диапазонах 1.X.

Последовательно рассмотреть вариации на отдельных  $L$ -оболочках можно на рис. 6. На нем показаны данные с КА *Meteo-M № 2* (2014 г.). Детекторы – гейгеровский счетчик с пороговой энергией по электронам  $E_e > 0.7$  МэВ и телескоп ДАС4 с пороговой энергией  $E_e > 0.1$  МэВ, смотрящий по вектору скорости КА.

Точки на этом рисунке представляют собой скользящие средние значения потоков за один оборот спутника вокруг Земли, т.е. за 4 последовательных пересечения внешнего пояса – по два пересечения в северном и южном полушариях. Таким образом, каждая точка – это как бы усредненный по всем долготам поток частиц на заданной  $L$ -оболочке, отнесенный к моменту времени между вторым и третьим пересечениями внешнего пояса. Следовательно, получившееся значение потока, очевидно, меньше, чем максимальный поток в этот же момент времени на той же  $L$ -оболочке на долготах Бразильской аномалии.

При сравнении верхней и нижней панели хорошо видно, что резкое возрастание потока частиц меньших энергий происходит раньше, чем более энергичных, потоки частиц меньших энергий во время рассматриваемого возмущения изменялись сильнее, а также амплитуда вариаций потока частиц больше для более высоких  $L$ -оболочек.

Следующий раз поток высокоскоростного СВ из той же самой корональной дыры пришел к орбите Земли 23.X и вызвал слабое геомагнитное возмущение – максимальная амплитуда  $Dst$ -ва-

риации составила всего  $-38$  нТ. Тем не менее, данное возмущение, как и на предыдущем обороте Солнца, вызвало заметные вариации потоков электронов ВРПЗ и их пространственного распределения. На верхней панели рис. 7 представлены вариации потоков релятивистских электронов ВРПЗ по данным ИСЗ *Meteo-M № 2*.

На рис. 7 видно, что характер вариаций в этом событии существенно отличается от первого – после падения интенсивности формируется дополнительный максимум на большем расстоянии от Земли. На нижней панели рис. 7 на временной зависимости геомагнитных индексов, как и для сентябрьского события, стрелками отмечены моменты времени, для которых далее приведены профили потоков электронов в зависимости от  $L$  на рис. 8.

Фоновым в данном случае был выбран профиль, полученный 22.X (толстая сплошная линия). На профиле, полученном 24.X (тонкая сплошная линия) видно, что поток частиц в районе старого максимума для всех трех энергетических каналов упал, как это и должно происходить на главной фазе бури, но у 150 кэВ-ных электронов начал образовываться новый максимум в районе  $L = 5.5$

Профиль 25.X (частые точки) демонстрирует для 150 кэВ-ных электронов падение потока в старом максимуме на  $L = 3.7$  и сдвиг нового максимума к  $L = 5$ . У потоков 700 кэВ-ных электронов также возникает второй максимум на  $L = 5$ , при этом интенсивность в обоих максимумах чуть ниже предыдущего дня, а поток 1.7 МэВ-ных электронов продолжает падать. 27.X (пунктирная линия) профиль пояса 150 кэВ-ных электронов еще немного упал на  $L < 5$ , а на  $L > 5$  вырос, новый на  $L = 5$  пояс 700 кэВ-ных вырос и расширился, а старый еще уменьшился, потоки релятивистских электронов в области старого максимума не изменились, но на  $L = 5-5.5$  начал образовываться новый максимум.

Профили, полученные 30.X (штрихпунктирные кривые) показывают дальнейшее расширение пояса 150 кэВ-ных электронов, при этом пояс 700 кэВ-ных, наоборот, немного сузился, по сравнению с 27.X, а у пояса релятивистских ( $>1.7$  МэВ) электронов стали четко видны два максимума – на  $L = 3.7$  и  $L = 5$ . Профили за 31.X (жирные точки) помимо сужения – падения потоков на  $L > 5$  для всех трех энергетических каналов, мало изменились по сравнению с 30.X. Отметим, что положение и глубина зазора между поясами во время данного события оставалась неизменной.

Вариации на отдельных  $L$ -оболочках с 22.X по 31.X показаны на рис. 9. Мы видим, что возрастание потока частиц меньших энергий также, как и в сентябрьском событии происходит раньше, чем

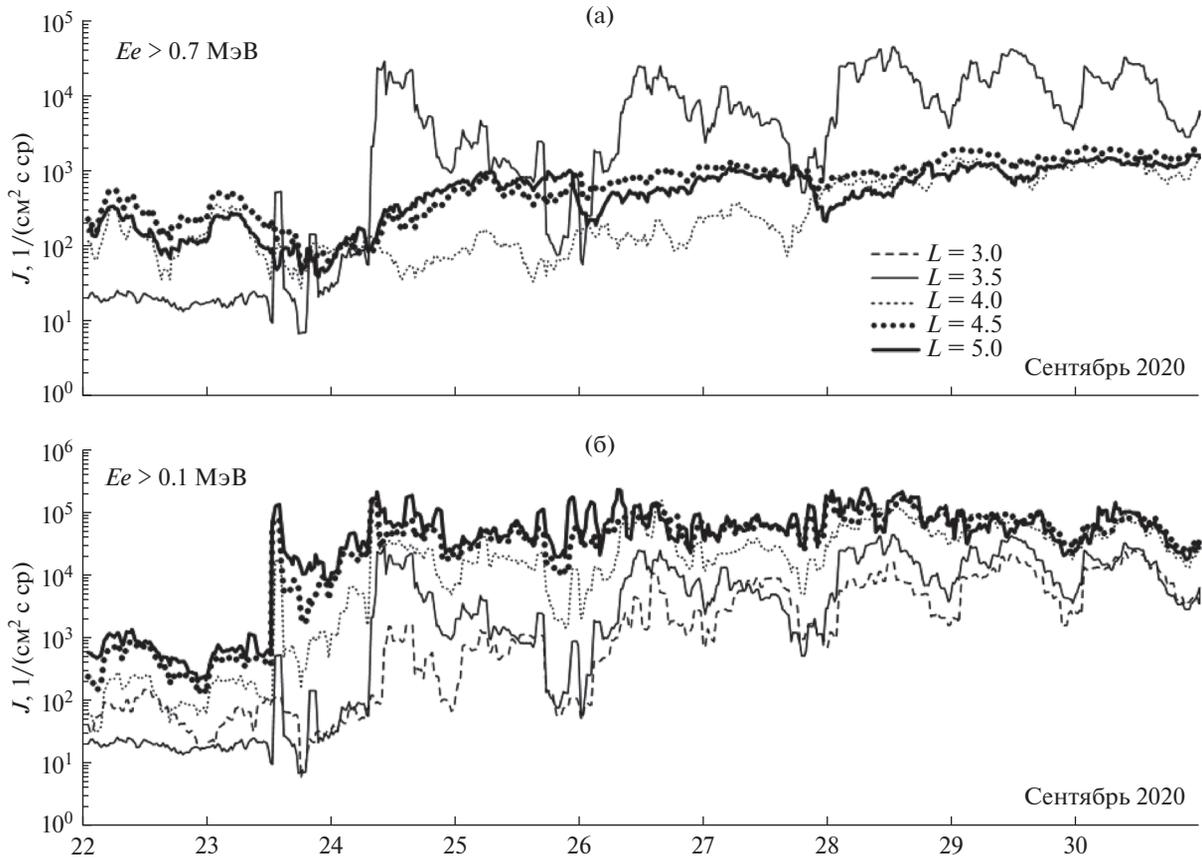


Рис. 6. Вариации потоков электронов ВРПЗ с энергиями  $>700$  кэВ (а),  $>100$  кэВ (б) на отдельных  $L$ -оболочках по данным КА *Метеор-М* № 2 с 22.IX по 1.X.

у более энергичных. Вариации потоков электронов во время рассматриваемого возмущения, как и в сентябре тем больше, чем выше номер  $L$ -оболочки и меньше энергия частиц. В отличие от сентябрьского события в октябрьском событии возрастание даже 100 кэВ-ных электронов на  $L = 3$  практически отсутствует.

На следующем обороте Солнца ВСП СВ из этой же корональной дыры пришел к Земле 21.XI. Он вызвал слабое геомагнитное возмущение — максимальная амплитуда  $Dst$ -вариации также, как и в октябре составила  $-38$  нТ. Данные слабые возмущения также стали причиной вариаций потоков электронов ВРПЗ. Представленные на верхней панели рис. 10 вариации потоков релятивистских ( $>2$  МэВ) электронов ВРПЗ по данным ИСЗ *Метеор-М* № 2 демонстрируют характерные вариации — падение интенсивности, а затем восстановление потоков электронов. На нижней панели рис. 10 на временной зависимости геомагнитных индексов, как и для сентябрьского и октябрьского событий, отмечены моменты времени, для которых далее приведены профили потоков электронов в зависимости от  $L$  на рис. 11.

В качестве фонового в ноябрьском событии взят профиль, полученный 19.XI (толстая сплош-

ная линия). Следующий набор профилей, полученный 21.XI (тонкая сплошная линия) показывает, что потоки электронов  $>700$  кэВ и  $>1.7$  МэВ падают, и их максимумы немного смещаются ближе к Земле — для  $>700$  кэВ с  $L = 4.2$  на  $L = 4$  и для  $>1.7$  МэВ с  $L = 4$  на  $L = 3.9$ . Поток электронов  $>150$  кэВ также упал, и помимо старого максимума, также сдвинувшегося с 4.2 на 4.1, образовался новый на  $L = 6.2$ . Профиль 22.XI (частые точки) демонстрирует возрастание интенсивности  $>150$  кэВ-ных электронов выше добуревого уровня, а также дальнейшее падение потоков  $>700$  кэВ-ных и  $>1.7$  МэВ-ных электронов в старых максимумах и образование новых максимумов на  $L = 5$ .

Поток 23.XI (пунктирная линия)  $>150$  кэВ-ных электронов не изменился для  $L < 6.5$  и вырос на более высоких  $L$ , поток  $>700$  кэВ-ных и 1.7 МэВ-ных в новых максимумах, которые сдвинулись ближе к Земле — на  $L = 4.8$  и  $L = 4.7$ , соответственно, существенно вырос. Рост потока в новом максимуме для электронов этих энергий продолжился и 25.XI (штрихпунктирная линия). Поток электронов с энергией  $>150$  кэВ остался тем же для  $L < 6.4$ , а на более высоких  $L$  существенно упал, на  $L = 7$  — на порядок по сравнению с предыдущим днем. Профили, полученные 29.XI

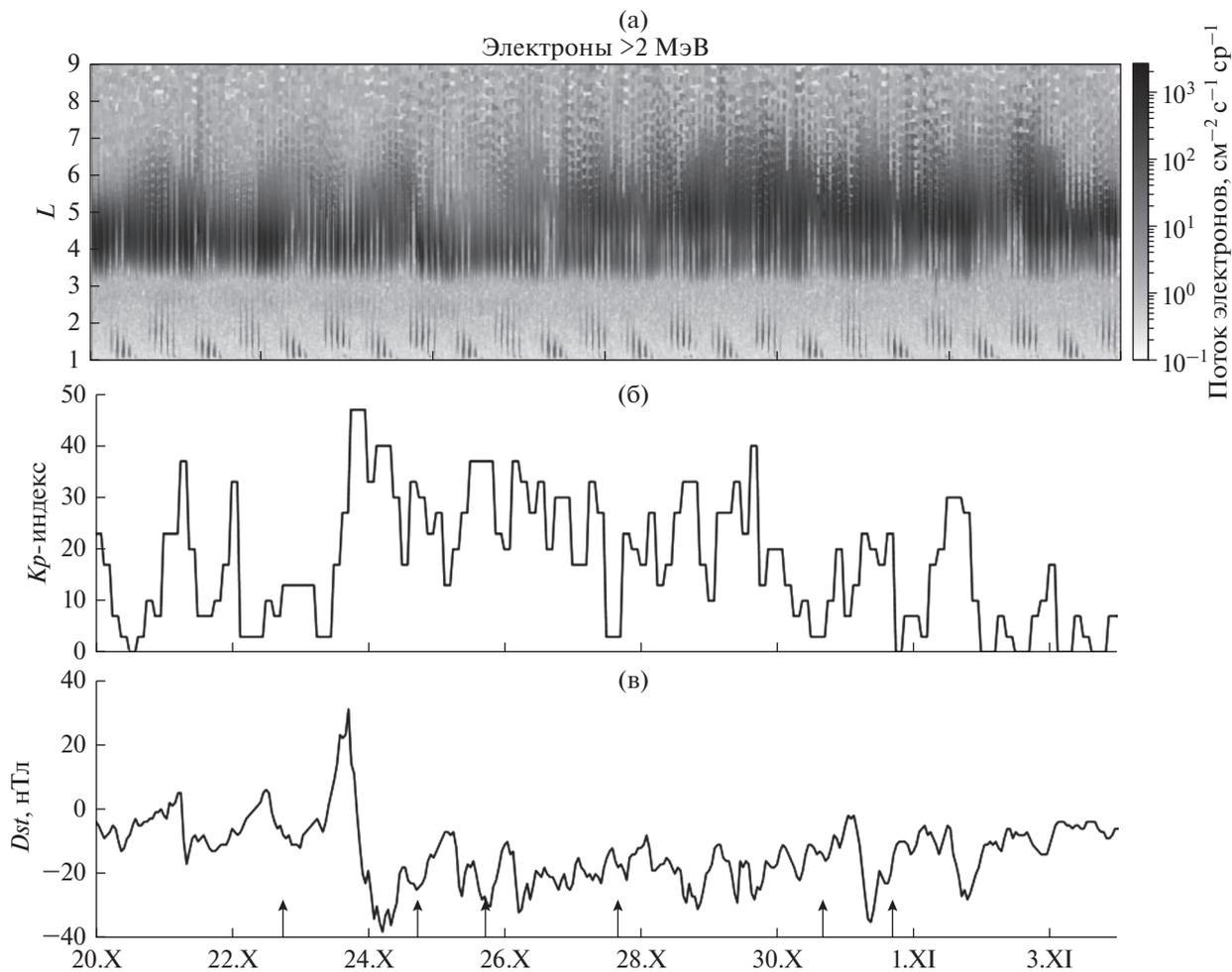


Рис. 7. То же, что на рис. 4 для интервала времени с 20.X по 30.X.

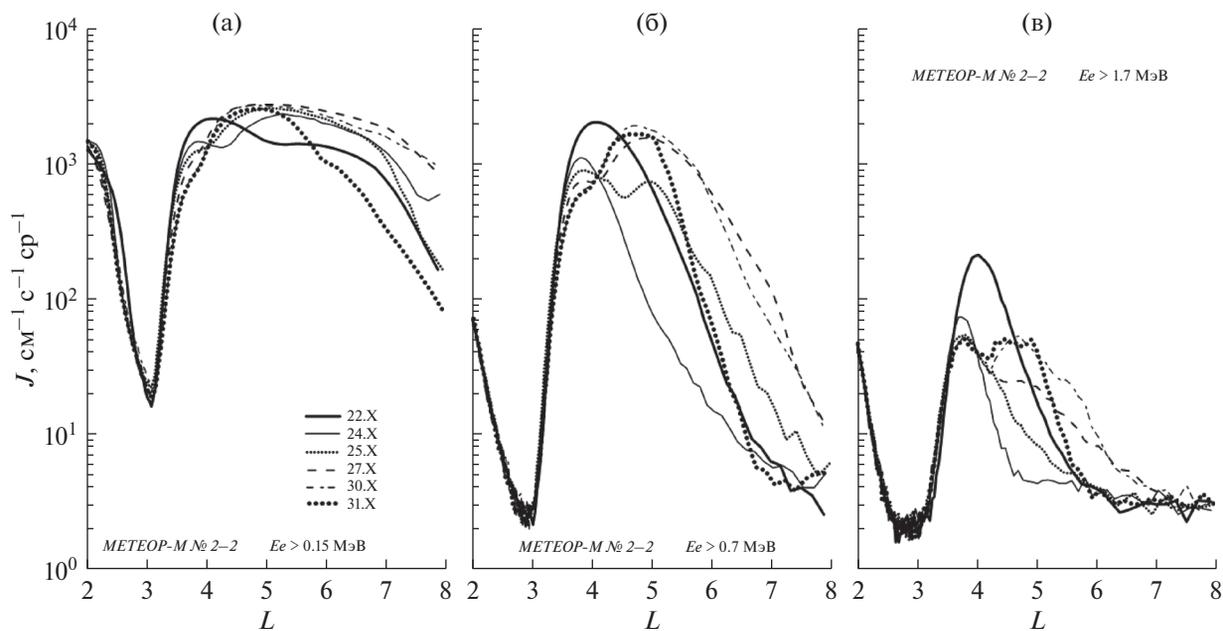


Рис. 8. То же, что на рис. 5 во время геомагнитного возмущения 23–30.IX.

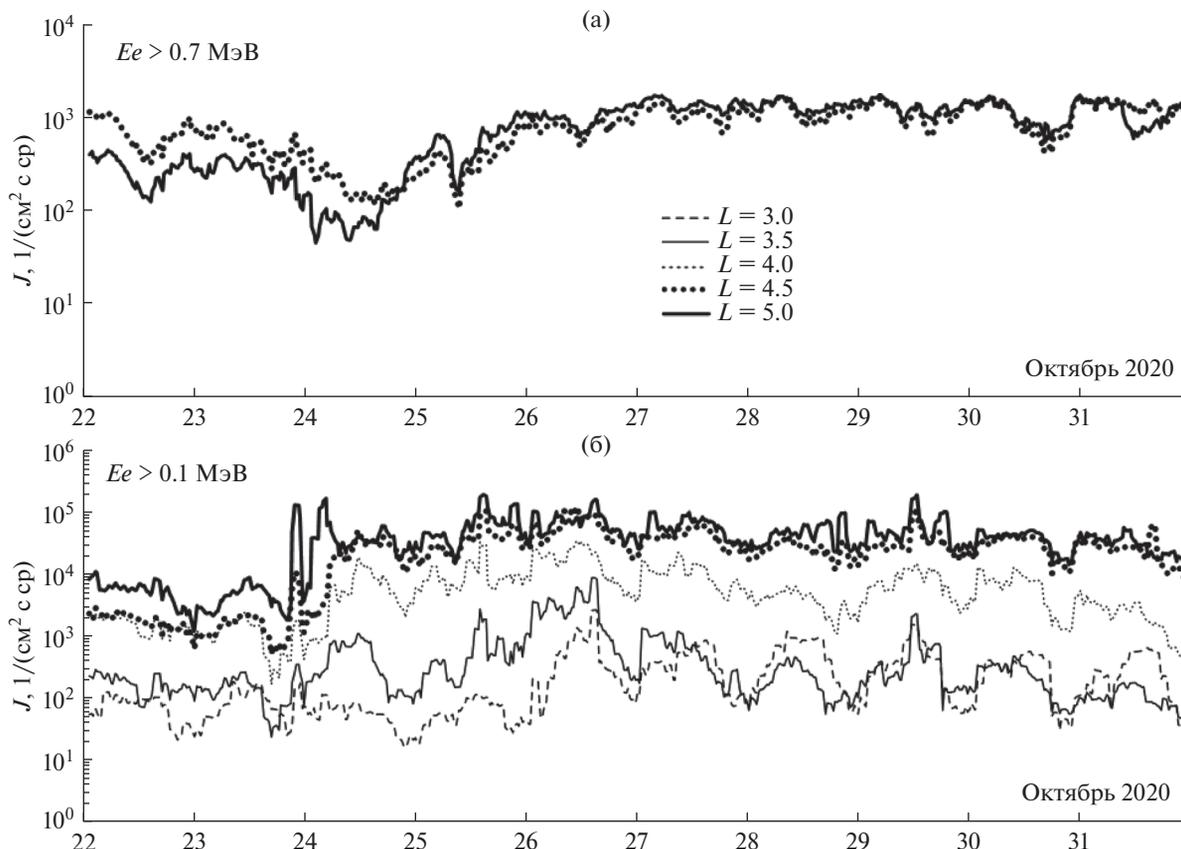


Рис. 9. То же, что на рис. 6 для интервала времени с 22.X по 31.X.

(жирные точки) для каналов  $>150$  и  $>700$  кэВ изменились не существенно по сравнению с 25.XI, за исключением падения интенсивности на  $L > 7$ , а у релятивистских электронов зазор между старым и новым поясом заполнился, и общая интенсивность еще подросла, но все равно не достигла добуревого уровня.

Таким образом, можно заключить, что в результате геомагнитного возмущения, начавшегося ( $Kp = 5-$ ,  $Dst = -38$  нТ) произошла инжекция электронов на  $L = 4.3$  по всем энергетическим каналам и началось смещение к Земле старого максимума. 23.XI сформировался новый максимум потоков на  $L = 4.7$ , а остатки “старого” пояса сместились на более низкие  $L$ -оболочки. Положение и глубина зазора между поясами во время данного события оставалась неизменной для всех трех энергетических каналов, как и во время октябрьского события.

На рис. 12 показаны вариации на отдельных  $L$ -оболочках с 20.XI по 29.XI. На нижней панели рис. 12 хорошо видно, что время момент возрастания потока электронов с энергией  $>150$  кэВ тем больше, чем больше выбранный номер  $L$ -оболочки. Рисунок на верхней панели показывает, что возрастание потоков электронов с энергией  $>700$  кэВ

на  $L = 5$  и  $4.5$  происходило одновременно. Также мы видим, что отмеченная для двух предыдущих событий закономерность — амплитуда вариаций потока частиц возрастает на более высоких  $L$ -оболочках — сохраняется и для третьего события.

#### ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выполненный анализ динамики внешнего радиационного пояса Земли в период слабых геомагнитных возмущений в сентябре—ноябре 2002 г. показывает, что большая амплитуда геомагнитных возмущений не является необходимым условием значимых вариаций потоков электронов ВРПЗ, возникающих в результате ускорения и рассеяния частиц в магнитосфере. Приход на орбиту Земли ВСП СВ оказывается недостаточным для изменения пространственных и спектральных характеристик ВРПЗ, причем скорость СВ в данном случае не превышала 650 км/с.

Вызванные этим небольшие геомагнитные возмущения, как было показано, приводят к возрастанию потоков субрелятивистских электронов ВРПЗ, а также опустошению пояса релятивистских электронов, с последующим его восстановлением на уровень выше добуревого, как это было

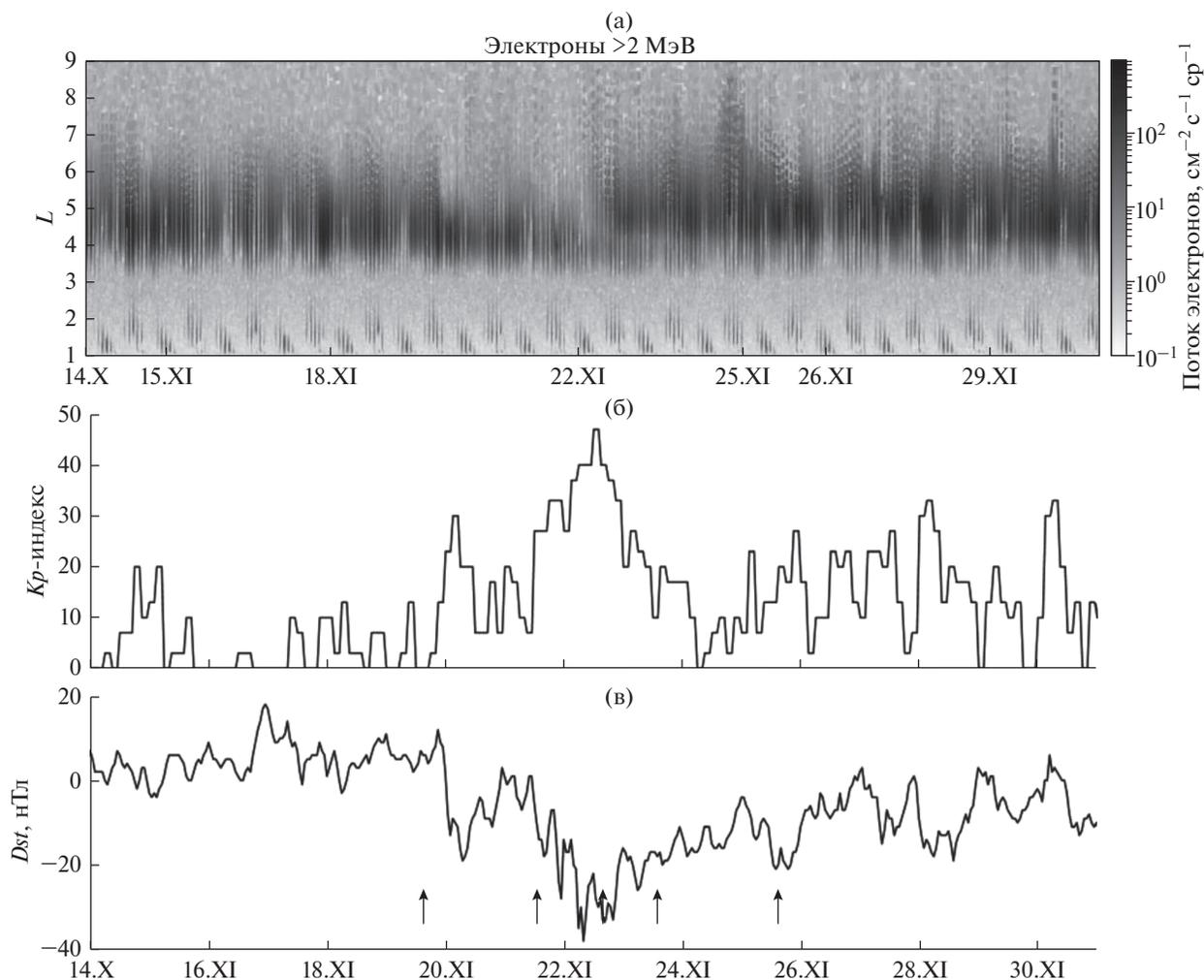


Рис. 10. То же, что на рис. 4 для интервала времени с 14.XI по 1.XII.

во время геомагнитного возмущения, начавшегося 23.IX. Данные результаты не противоречат результатам, полученным в предыдущих экспериментах, в частности на ИСЗ серии *КОРОНАС – КОРОНАС-Ф* [7] и *КОРОНАС-Фотон* [11–13] – резкому снижению интенсивности релятивистских электронов во внешнем РПЗ на главной фазе геомагнитной бури. В нашем случае о полноценных бурях с главной фазой говорить трудно, но мы видим, что для опустошения пояса релятивистских электронов не требуется выраженной главной фазы бури. При этом следует отметить, что после при сравнении трех исследованных событий было получено, что возрастание потоков релятивистских электронов (>1.7 и >2 МэВ) выше добуревого уровня наблюдалось только для более сильного возмущения, наблюдавшегося в сентябре 2020. Поток субрелятивистских электронов (>700 кэВ) также возрос выше добуревого уровня только после сентябрьского, а после октябрьского и ноябрьского возмущений лишь вернулся на добуревой уровень, но новый максимум пояса об-

разовался дальше от Земли – на более высоких  $L$ -оболочках.

Помимо того следует отметить, что для рассеяния частиц, оказывается достаточно минимального возмущения в солнечном ветре, как это наблюдалось 6.X и 31.IX, когда после минимального воздействия поток релятивистских электронов упал более, чем на порядок на геостационарной орбите (см. рис. 2). Следует отметить, что данные российского КА *Электро-Л*, находящегося на геостационарной орбите позволяют верифицировать данные о потоке релятивистских электронов с КА *GOES16*. Вариации потоков релятивистских электронов во ВРПЗ экспериментально изучались как в России, так и за рубежом различными научными коллективами с момента их открытия до наших дней, например, [8–10, 14–16] и ссылки там. Корреляция между вариациями потоков электронов ВРПЗ и параметрами солнечного ветра, в частности со скоростью СВ, хорошо известна и была показана во многих из этих работ, а также детально была рассмотрена в работах [17, 18].

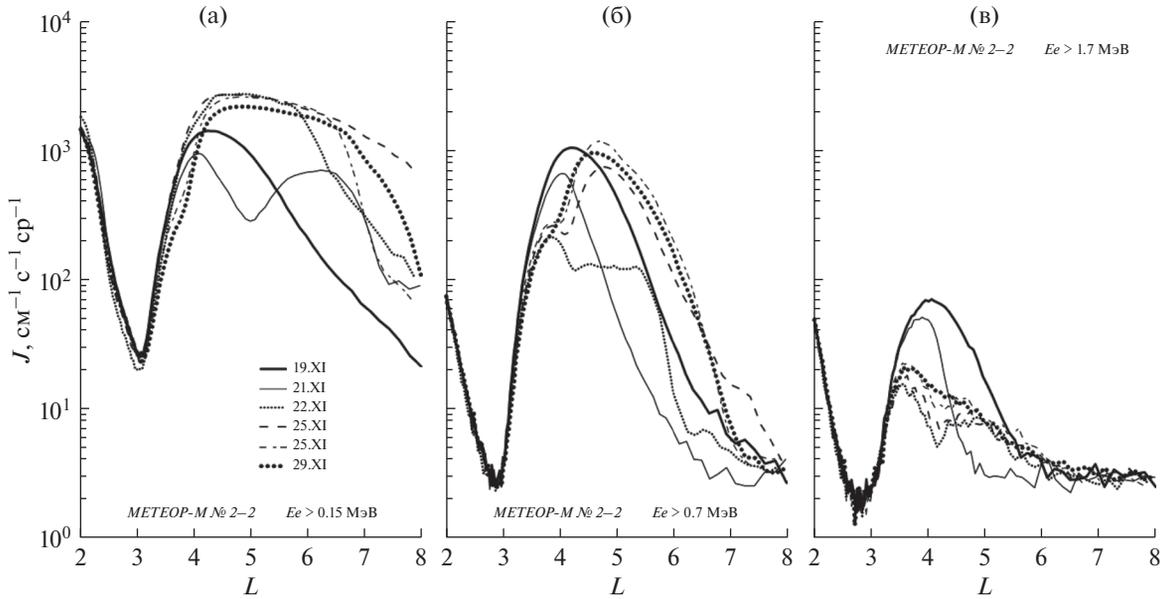


Рис. 11. То же, что на рис. 5 во время геомагнитного возмущения 20–29.XI.

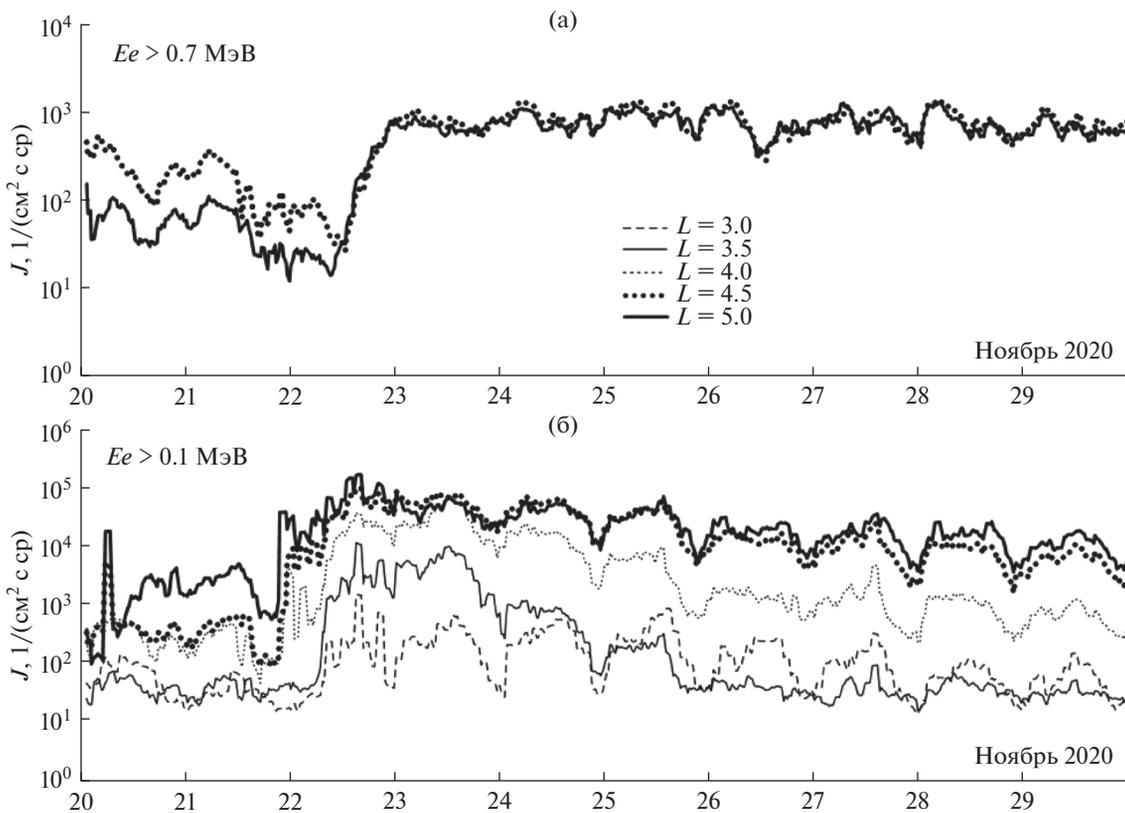


Рис. 12. То же, что на рис. 6 для интервала времени с 20.XI по 29.XI.

Представленные в настоящей работе экспериментальные данные не противоречат полученным ранее результатам, и ранее известный факт, что высокая скорость солнечного ветра можно рассматривать как основной индикатор вариаций ВРПЗ и в случае не только сильных, но и слабых

геомагнитных возмущений. При этом сам по себе солнечный ветер не может ускорить электроны ВРПЗ. В настоящее время, существует статистически подтвержденная гипотеза, что ВСП СВ сопровождаются пульсациями Pc5 (2–7 МГц) [3, 18], и ускорение и рассеяние электронов могут быть

результатом взаимодействия “волна-частица”. Предположительно, основным агентом, вызывающим возбуждение этих полярных пульсаций, является проникновение флуктуаций плазмы СВ на переднем фронте магнитного облака. Однако, попытки точного теоретического объяснения причин резкого возрастания потоков РЭ во внешнем радиационном поясе Земли сталкиваются с трудностями из-за существования целого ряда разнообразных физических факторов, играющих сравнимую между собой важную роль. Это приводит к большой неопределенности в параметрах пространственной, пич-угловой и энергетической диффузии при различных типах волновой активности. Поэтому новые экспериментальные данные, полученные в различных физических условиях и их систематизация остаются актуальной задачей в данной области исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным российских КА серии *Электро-Л* и *Метеор-М* была изучена радиационная обстановка в ОКП в сентябре–ноябре 2020. На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

С сентября по ноябрь 2020 радиационная обстановка в ОКП определялась вариациями потоков электронов во внешнем РПЗ, вызванными рекуррентными потоками высокоскоростного солнечного ветра, истекавшими из северной корональной дыры, существовавшей в течение нескольких оборотов Солнца.

При анализе вариаций потоков электронов различных энергий видно, что вариации потоков 100 кэВ-ных электронов существенно сильнее, чем релятивистских. Также видно, что чем выше энергия электронов, тем слабее вариации потоков частиц на малых  $L$ .

На сегодняшний день информация, поступающая с российских КА позволяет оперативно оценивать радиационную обстановку в ОКП.

Данные о потоках электронов геостационарной орбите, измеряемые на КА *GOES16*, представлены Space Weather Prediction Center, Boulder, CO, National Oceanic and Atmospheric Administration, US Dept. of Commerce.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cole D.G.* Space weather: Its effects and predictability // *Space Sci. Rev.* 2003. V. 107. P. 295–302.
2. *Белов А.В., Виллорези Дж., Дорман Л.И. и др.* Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // *Геоматизм и аэронавигация.* 2004. Т. 44. № 4. С. 502–510.
3. *Romanova N., Pilipenko V.* ULF wave indices to characterize the solar wind – magnetosphere interaction and relativistic electron dynamics // *Acta Geophys.* 2008. V. 57. № 1. P. 158–170.
4. *Iucci N., Levitin A.E., Belov A.V. et al.* Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits // *Space Weather.* 2005. V. 3. № 1. P. S01001. <https://doi.org/10.1029/2003SW000056>
5. *Kudela K.* Space weather near Earth and energetic particles: selected results // *J. Physics: Conf. Series.* 2013. V. 409. Is. 1. Article id. 012017.
6. *Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю.* Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: Аспекты космической погоды // *Геофизические процессы и биосфера.* 2009. Т. 8. № 1. С. 5–35.
7. *Кузнецов С.Н., Мягкова И.Н., Юшков Б.Ю. и др.* Динамика радиационных поясов Земли во время сильных магнитных бурь по данным ИСЗ *КОРОНАС-Ф* // *Астрономический вестник. Исследования солнечной системы.* 2007. Т. 41. № 4. С. 350–359.
8. *Friedel R.H., Reeves W.G.P., Obara T.* Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere – A review // *J. Atmos. Solar. Terr. Phys.* 2002. V. 64. P. 265–283.
9. *Reeves G.D., Morley S.K., Friedel R.H.W. et al.* On the relationship between relativistic electron flux and solar wind velocity: Paulikas and Blake revisited // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A02213.
10. *Turner D.L., Shprits Y., Hartinger M., Angelopoulos V.* Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms // *Natural Physics.* 2012. V. 8. P. 208–212.
11. *Баринова В.О., Богомолов А.В., Калегаяев В.В. и др.* Динамика внешнего радиационного пояса Земли в ноябре 2009 года по данным экспериментов, проводившихся на ИСЗ *КОРОНАС-ФОТОН* и *Метеор-М № 1* // *Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия.* 2011. № 4. С. 121–126.
12. *Myagkova I.N., Panasyuk M.I., Denisov Yu.I. et al.* Correlation between the earth’s outer radiation belt dynamics and solar wind parameters at the solar minimum according to emp instrument data onboard the coronas-photon satellite // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011. V. 51. № 7. P. 897–901.
13. *Denisov Y.I., Kalegaev V.V., Myagkova I.N. et al.* Experiment on the measurement of charged particle flows with ELECTRON-M-PESCA onboard the CORONAS-PHOTON solar research satellite // *Sol. Syst. Res.* 2011. T. 45. P. 206–211.
14. *Williams D.J., Arens J.F., Lanzerotti L.J.* Observations of trapped electrons at low and high altitudes // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 5673–5696.
15. *Vakulov P.V., Kovrygina L.M., Mineev Yu.V., Tverskaya L.V.* Variation in intensity and spectrum of energetic electrons in Earths radiation belts during strong magnetic disturbances // *Space Res.* 1976. V. 16. P. 523–527.
16. *Li X., Temerin M.A.* The electron radiation belt // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 95. P. 569–580.
17. *Kataoka R., Miyoshi Y.* Average profiles of the solar wind and outer radiation belt during the extreme flux enhancement of relativistic electrons at geosynchronous orbit // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. P. 1335–1339.
18. *Мягкова И.Н., Шугай Ю.С., Веселовский И.С., Яковчук О.С.* Сравнительный анализ влияния рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра на радиационное состояние околоземного космического пространства в апреле–июле 2010 г. // *Астрономический вестник.* 2013. Т. 47. № 2. С. 141–155.

УДК 550.385

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ДАННЫМ БАЛЛОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛЯРНЫХ СПУТНИКОВ 1–6.II.2015

© 2021 г. А. Д. Кугушева<sup>1</sup> \*, В. В. Калегаетв<sup>1</sup>, Н. А. Власова<sup>1</sup>, К. А. Петров<sup>1</sup>,  
Г. А. Базилевская<sup>2</sup>, В. С. Махмутов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

\*kugusheva.ad@gmail.com

Поступила в редакцию 03.03.2021 г.

После доработки 27.05.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Представлены результаты анализа пространственно-временных характеристик и динамики высыпаний магнитосферных электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ. По данным о потоках электронов, измеренных вертикальным и горизонтальным детекторами на спутниках *Meteor M2*, *POES-18* и *POES-19*, были идентифицированы высыпания частиц, соответствующие событию, зарегистрированному в ходе баллонного эксперимента ФИАН 2.II.2015. Высыпания обнаружены на *L*-оболочках от 4 до 8 в широком диапазоне *MLT*. Определены области в приэкваториальной магнитосфере, где преимущественно действуют механизмы, ответственные за рассеяние электронов и их вторжение в атмосферу Земли в ходе исследуемого события.

DOI: 10.31857/S0023420621060054

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из проявлений динамики магнитосферы Земли являются высыпания в атмосферу энергичных электронов внешнего радиационного пояса. Как правило, высыпания наблюдаются во время геомагнитных возмущений, в ходе которых происходит, как ускорение заряженных частиц, так и рассеяние захваченных электронов внешнего радиационного пояса и их высыпание в конус потерь [1–3]. Оба этих процесса могут быть результатом развития волновой активности в магнитосфере [4, 5].

Вариации внешнего электронного РП могут происходить при сохранении адиабатических инвариантов при условии относительно медленных изменений геомагнитного поля по сравнению с характерными временами движения электронов. При этом могут регистрироваться изменения потоков электронов, не связанные с реальными потерями или ускорением частиц.

Наряду с адиабатическим механизмом вариаций потоков захваченных электронов в радиационных поясах присутствуют и процессы, приводящие к реальным потерям. Понижение потока электронов внешнего радиационного пояса может происходить либо за счет потерь на магнито-

паузе, либо, при рассеянии в конус потерь и высыпания в атмосферу [6, 7].

Рассеяние электронов в конус потерь связано с нарушением адиабатичности движения частиц либо в области малого радиуса кривизны магнитного поля [8], либо при взаимодействии с низкочастотными волнами. Резонансное взаимодействие между электронами и ОНЧ волнами [9] и быстрая, меняющаяся во времени, радиальная диффузия электронов под воздействием УНЧ волн [10] рассматриваются в качестве главных механизмов ускорения электронов до релятивистских энергий.

Потери частиц во время геомагнитной бури происходят вследствие питч-угловой диффузии при взаимодействии частиц с волнами [11]. Изменение питч-углового распределения захваченных частиц, приводящее к их высыпанию в атмосферу из конуса потерь, происходит в результате резонансного взаимодействия с низкочастотными волнами: магнитосферными хорами, плазмасферными шипениями, электромагнитными ионно-циклотронными волнами и др. [13–15].

Высыпания энергичных электронов могут регистрироваться непосредственно на полярных низковисотных ИСЗ, например на аппаратах серий *POES* и *Meteor*. В то же время баллонные

эксперименты также позволяют обнаруживать вторжения энергичных электронов по рентгеновскому тормозному излучению на высотах 20–30 км [16, 17].

Физический институт им. П.Н. Лебедева регистрирует высыпания магнитосферных электронов ( $E > \sim 100$  кэВ) в атмосферу Земли с 1961 г. по настоящее время в ходе долговременного аэростатного эксперимента по изучению потоков заряженных частиц в Мурманской области ( $L = 5.5$ ) [17]. Эти данные являются самым длинным однородным рядом подобных измерений и позволяют исследовать долговременные вариации высыпаний энергичных электронов в атмосферу. В то же время, в связи с тем, что аэростатные эксперименты, как правило, кратковременны, нерегулярны, и привязаны к долготно-ограниченной области над земной поверхностью, они регистрируют события, магнитосферные источники которых располагаются в узком секторе MLT. Таким образом, остаются непонятными магнитосферные источники высыпаний, их пространственные и временные характеристики. Спутниковые измерения потоков высыпающихся энергичных электронов на полярных орбитах позволяют существенно обогатить и дополнить данные аэростатных экспериментов. Одновременные наблюдения высыпаний энергичных электронов в разных секторах MLT на разных высотах, их сопоставление с характеристиками межпланетной среды и геомагнитными вариациями позволяют лучше понять физические механизмы этого явления, установить магнитосферные источники высыпаний и их связь с параметрами солнечного ветра и состоянием магнитосферы.

В настоящей работе было выполнено детальное исследование события из базы данных ФИАН, зарегистрированного 2.II.2015. С использованием данных измерений потоков электронов на ИСЗ *Meteor M2*, *POES-18* и *POES-19* были определены пространственные масштабы и истинная длительность этого события и восстановлена глобальная динамика высыпаний электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ в течение периода 1–6.II.2015.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для определения пространственно-временных характеристик высыпаний энергичных электронов были использованы данные одновременных измерений полярных низкоорбитальных космических аппаратов *Meteor M2* (Росгидромет РФ) и *POES* (NOAA, USA). Орбиты спутников – солнечно-синхронные, что означает, что в течение всей их работы в космическом пространстве плоскость орбиты сохраняет ориентацию по локальному времени.

### 1) *Meteor M2*

Российский ИСЗ, движется по круговой солнечно-синхронной орбите высотой 825 км и наклонением  $98.8^\circ$ . Период обращения спутника составляет 101.4 мин, таким образом, за сутки совершается 14 оборотов вокруг Земли. Орбита спутника располагается в предполуденном-предполуночном секторе по локальному времени.

На спутнике установлены несколько детекторов заряженных частиц, в том числе, горизонтальный MGS1-M (ДАС4,  $90^\circ$ ) и вертикальный SKL-M (ДАС4,  $0^\circ$ ). Эти детекторы предоставляют данные о потоках электронов с энергиями от 100 кэВ до 8 МэВ. На высоких широтах вертикальный детектор направлен, примерно, вдоль магнитного поля, на приэкваториальных широтах – ортогонально полю. С изменением широты меняется относительная ориентация детекторов и магнитной силовой линии. На высоких широтах горизонтальный детектор регистрирует, преимущественно, захваченные частицы, вертикальный – высыпающиеся.

Обычно, в области внешнего радиационного пояса наблюдается анизотропное распределение частиц, когда вертикальный детектор регистрирует потоки, на 4–5 порядков ниже, чем горизонтальный. Рассеяние частиц в магнитосфере, связанное с геомагнитной и волновой активностью, приводит к изотропизации потоков частиц, при этом оба детектора регистрируют близкие потоки. Характеристики орбиты позволяют получать данные о потоках электронов внешнего радиационного пояса (на  $L \sim 4-7$ ) четыре раза за каждый оборот. На рис. 1 приведен пример измерений потоков электронов с энергиями выше 100 кэВ за полный оборот спутника вертикальным и горизонтальным детекторами. Можно видеть четыре пересечения внешнего радиационного пояса и возрастания потоков по измерениям вертикального детектора, свидетельствующие о высыпаниях электронов.

### 2) *Polar Operational Environmental Satellites (POES)*

POES представляет собой группу полярно-орбитальных спутников (на данный момент функционируют три из них: *POES-15*, *POES-18*, *POES-19*), движущихся по круговым солнечно-синхронным орбитам.

В настоящей работе использованы данные от двух спутников: *POES-18* и *POES-19*. Их орбиты расположены на высоте 854 км над Землей, период обращения составляет 102 мин, наклонение  $\sim 100^\circ$ . Положение плоскости орбиты – послеполуденное – послеполуночное (*POES-19*) и утреннее – вечернее (*POES-18*). Таким образом, вместе с *Meteor M2* эти спутники обеспечивают полный и приблизительно-равномерный охват по секторам MLT.

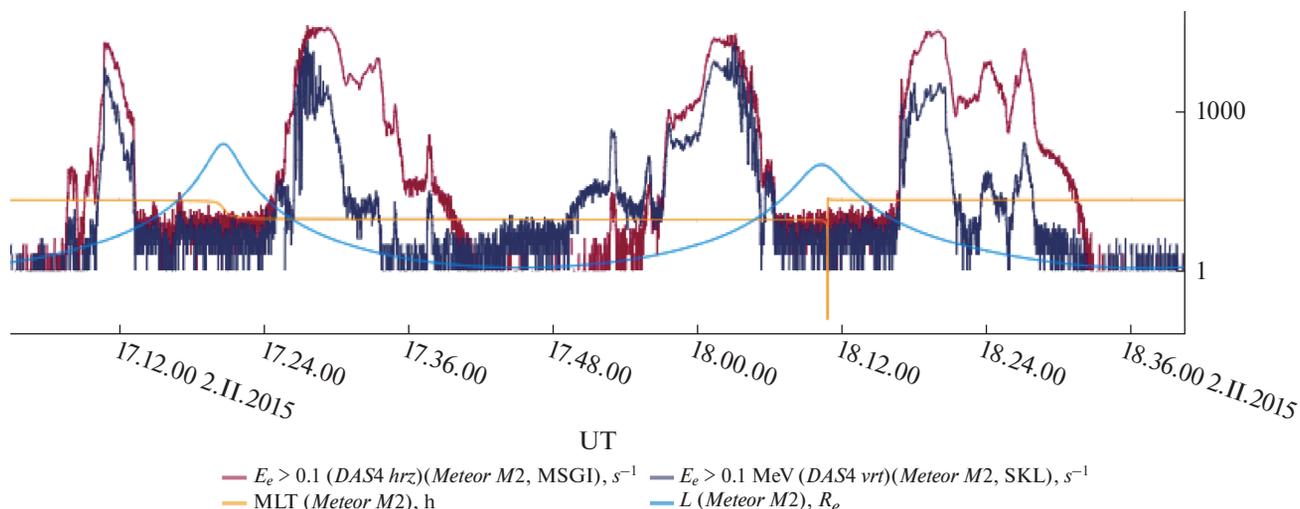


Рис. 1. График потоков электронов, измеренных ИСЗ *Метеор М2* за полный оборот.

На спутниках установлен детектор *MEPED*, регистрирующий потоки электронов в диапазоне энергий 30 кэВ–2.5 МэВ по горизонтальному и вертикальному направлениям.

Одновременные измерения *Метеор М2*, *POES-18* и *POES-19* позволяют за 100 мин обследовать состояние внешнего радиационного пояса в 6 разрезах по *MLT* (приблизительно, вблизи направлений на 2, 6, 10, 14, 18 и 22 ч).

### 3) *ACE*

Американский космический аппарат находится в точке Лагранжа *L1* между Солнцем и Землей. Комплекс инструментов на аппарате позволяет осуществлять широкий набор наблюдений, в том числе, параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Одновременные измерения полярных КА и спутника *ACE* позволяют выяснить причинно-следственные связи между состоянием межпланетной среды и потоками электронов внешнего РПЗ. В настоящее время, для измерений параметров солнечного ветра используется аппарат *DISCOVER*, также располагающийся в окрестности точки *L1*.

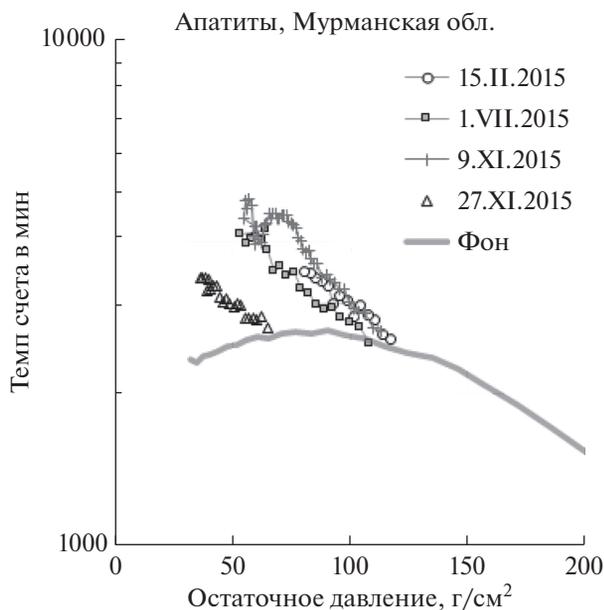
### 4) Аэростатные данные

Физический институт им. П.Н. Лебедева регистрирует высыпания магнитосферных электронов ( $E > \sim 100$  кэВ) в атмосферу Земли с 1961 г. по настоящее время в ходе длительного эксперимента по изучению высыпаний заряженных частиц в верхней атмосфере [17, 18]. На высотах выше 20 км возможна регистрация тормозного рентгеновского излучения, вызванного взаимодействием энергичных электронов с атомами атмосферы. Ниже 20 км рентгеновское излучение поглощается атмосферой, поэтому такие наблюдения можно осуществить только на больших высотах, например, с помощью аэро-

ставов. Интенсивность излучения позволяет косвенно регистрировать события, приводящие к формированию потоков высыпающихся из магнитосферы электронов.

Измерения в атмосфере Земли проводятся стандартным радиозондом космических лучей. Детекторами служат гейгеровский счетчик и телескоп из двух счетчиков. Электроны, высыпавшиеся из магнитосферы, поглощаются на высоте более 50 км, но они генерируют тормозное излучение, которое регистрируется одиночным счетчиком, чувствительным к рентгеновскому излучению ( $E > 20$  кэВ) с эффективностью  $\sim 1\%$ . Повышение темпа счета радиозонда во время высыпаний электронов отличается от эффекта вторжения в атмосферу солнечных протонов отсутствием возрастания на телескопе и сильными вариациями потока частиц. Повышение темпа счета, как правило, начинается при подъеме зонда на высоты более 20 км. Вычитая из данных одиночного счетчика фон, образованный галактическими космическими лучами, оцененный по результатам предыдущих полетов радиозонда, можно получить зависимость темпа счета от давления остаточной атмосферы. На рис. 2 приведены примеры высыпаний, зарегистрированных в ходе экспериментов в феврале, июле и ноябре 2015 г.

В настоящей работе использовалась база данных, созданная сотрудниками ФИАН по высыпаниям электронов внешнего радиационного пояса Земли [18], зарегистрированным в 2015–2017 гг. в ходе аэростатных экспериментов в Мурманской области ( $L = 5.5$ ). Для детального анализа магнитосферных источников высыпаний было отобрано событие 2.II.2015. Критериями отбора были: интенсивный характер высыпаний, высокие энергии электронов, наличие моментов времени,



**Рис. 2.** Наблюдения высыпаний на баллонах в атмосфере над Мурманской областью в 2015 г. Серым цветом показан фон от галактических космических лучей, возрастания над фоном соответствуют нескольким событиям, зарегистрированным в 2015 г.

при которых ИСЗ *Метеор М2* в момент регистрации высыпаний находился вблизи Мурманской области или в магнитосопряженной точке.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

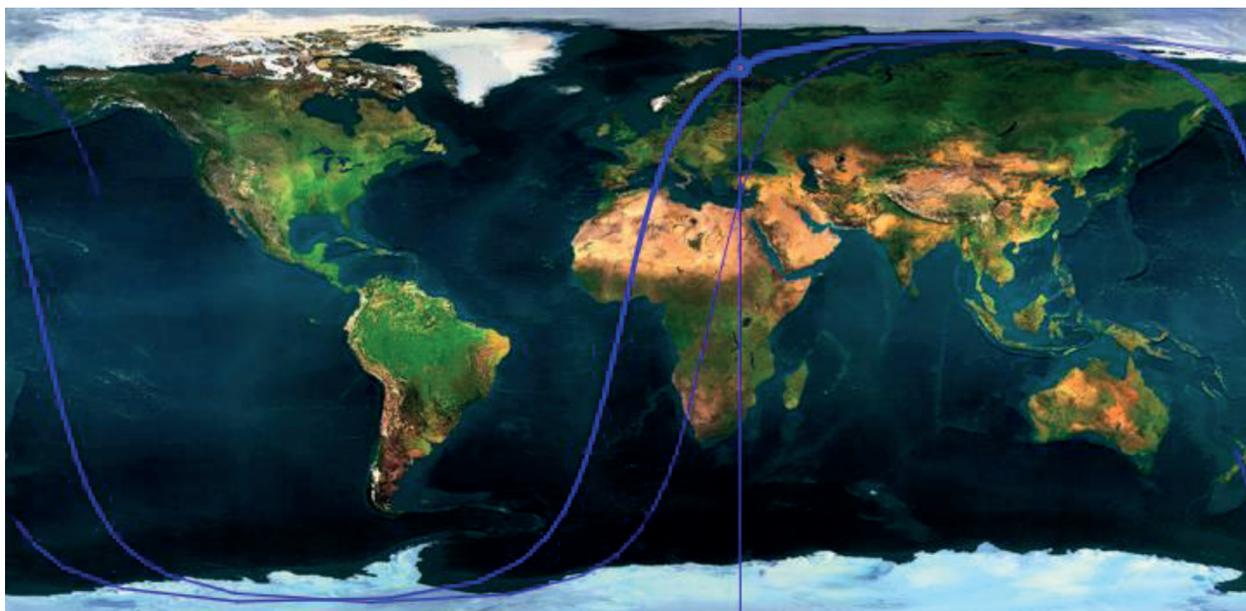
Согласно информации, приведенной в базе данных физического института им. П.Н. Лебеде-

ва, 2.II.2015 в диапазоне от 12.59 до 13.12 UT над территорией Мурманской области (на  $L = 5.5$ ) в ходе баллонного эксперимента было зарегистрировано рентгеновское излучение, предположительно связанное с рассеянием захваченных электронов в конус потерь и их высыпанием в атмосферу из внешнего радиационного пояса. Магнитное локальное время точки наблюдений в 13.00 UT составляло  $\sim 16$  ч.

По регистрации возрастаний потоков электронов, измеренных вертикальным детектором на ИСЗ *Метеор М2*, были идентифицированы высыпания частиц, происходившие в течение нескольких дней, и, предположительно соответствующие событию, обнаруженному в ходе аэростатных наблюдений. Следует ожидать, что рентгеновское излучение, зарегистрированное 2.II.2015, является частью глобального события в период от 16.38 UT 1.II.2015 до 14.26 UT 6.II.2015, в ходе которого высыпания регистрировались ИСЗ *Метеор М2* на  $L$ -оболочках от 4 до 7.

В ходе данного события наблюдались локализованные по широте возрастания потоков электронов с энергиями от 100 до 700 кэВ, измеренные вертикальным детектором SKL.

При помощи данных об орбите спутника были найдены максимально близкие к событию баллонной регистрации рентгеновского излучения моменты времени для ИСЗ *Метеор М2*, когда он находился непосредственно над областью регистрации высыпаний в ходе баллонного эксперимента, при этом на самом спутнике также наблюдались высыпания электронов. Рис. 3 показывает положение спутника в 08.56 UT 2.II.2015.



**Рис. 3.** Положение спутника *Метеор М2* 2.II.2015 в 08.56 UT.

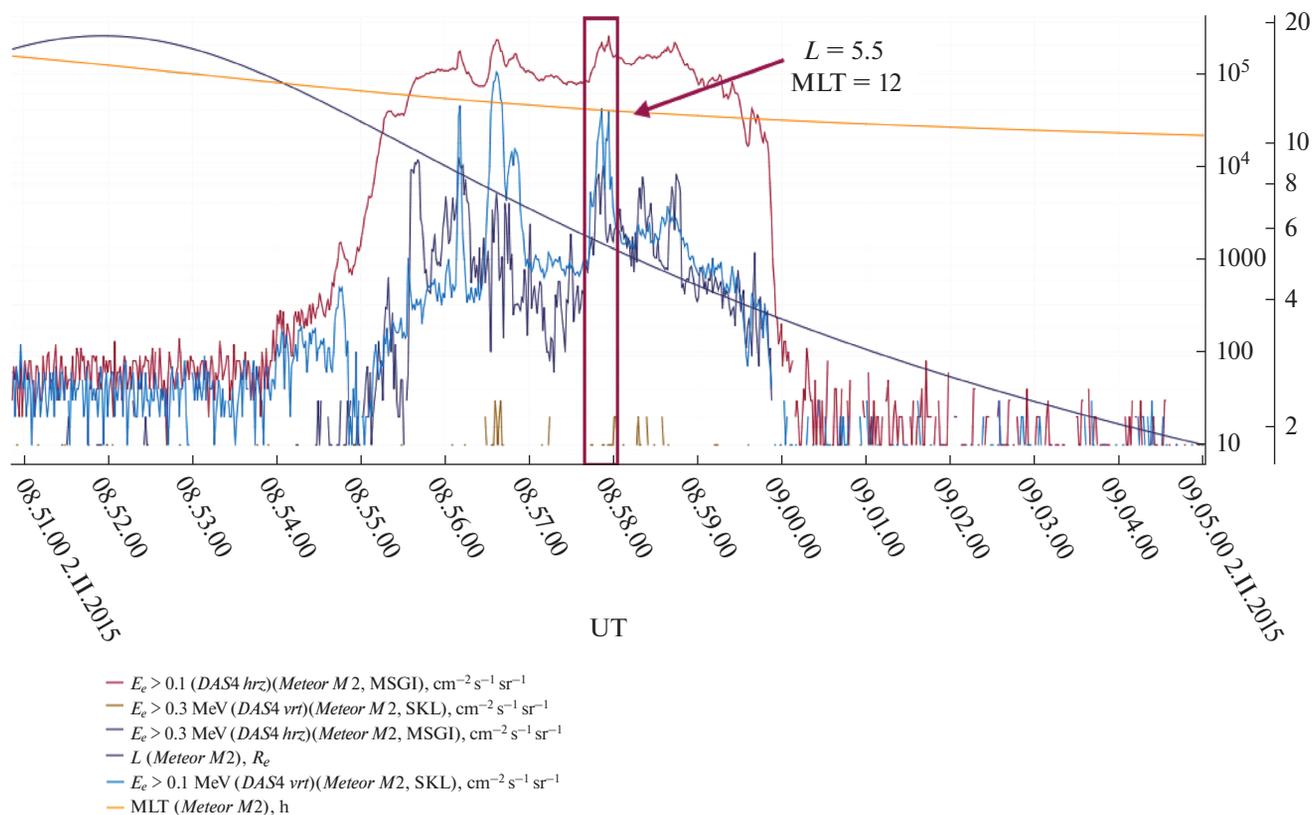


Рис. 4. Данные о потоках электронов в этот же момент времени.

На рис. 4 представлен временной профиль потоков частиц 0.1 и 0.3 МэВ, измеряемых детекторами MSGI и SKL на ИСЗ *Meteor M2*. Можно видеть возрастания потоков высыпающихся электронов на магнитной оболочке  $L = 5.5$  в 08.56 UT 2.11.2015, до наблюдений на баллоне. Следует отметить, что из-за особенностей солнечно-синхронной орбиты ИСЗ *Meteor M2*, ему, в принципе, невозможно оказаться над Мурманской областью в момент запуска аэростата UT = 13 ч. Как уже упоминалось, его орбита лежит в плоскости предполуденных-предполуденных MLT.

Для лучшего понимания причин и источников высыпаний рассмотрим условия в околоземном пространстве. Из графиков (рис. 5) видно, что вечером 1.11.2015 началось понижение индекса  $Dst$ , который достиг минимального значения  $-46$  нТл в 19.00 UT 2.11.2015, что свидетельствует о развитии слабого геомагнитного возмущения. Можно видеть, что триггером возмущения стала вариация  $B_z$ -компоненты ММП, которая вечером 1.11.2015 приняла южное направление.

В солнечном ветре регистрируется скачок давления, и происходит возрастание скорости солнечного ветра с 400 до 700 км/с, которое затем спадает в течение трех суток. Эти события и повлекли за собой развитие бури, фаза восстановления которой длилась 4 дня. Также наблюдаются

флуктуации аврорального  $AE$ -индекса, соответствующие началу высыпаний.

По данным низкоорбитальных спутников высыпания электронов начались уже на начальной фазе бури. На рис. 6а представлены координаты источников высыпаний электронов с энергиями выше 0.1 и выше 0.3 МэВ, зарегистрированных ИСЗ *Meteor M2*, в течение начальной фазы возмущения. Используется полярная система координат, где в качестве радиальной переменной выступает  $L$ , в качестве угловой – MLT. Каждая точка на графике является проекцией координат высыпаний, зарегистрированных на орбите по измерениям спутников, на плоскость геомагнитного экватора. Фактически, это области в магнитосфере, где произошло рассеяние частиц радиационного пояса (питч-угловая диффузия), связанное, предположительно, с волновой активностью. При проецировании на экваториальную область мы пренебрегаем возмущением геомагнитного поля вследствие развития магнитосферных токов, что приведет к изменению положения экваториальной проекции высыпаний. Мы предполагаем, что слабое геомагнитное возмущение 2.11.2015 не внесло значительных изменений в структуру силовых линий магнитосферы.

Спутник *Meteor M2* позволяет выполнять измерения вдоль меридиана  $\sim 09$  и  $\sim 21$  MLT. Можно

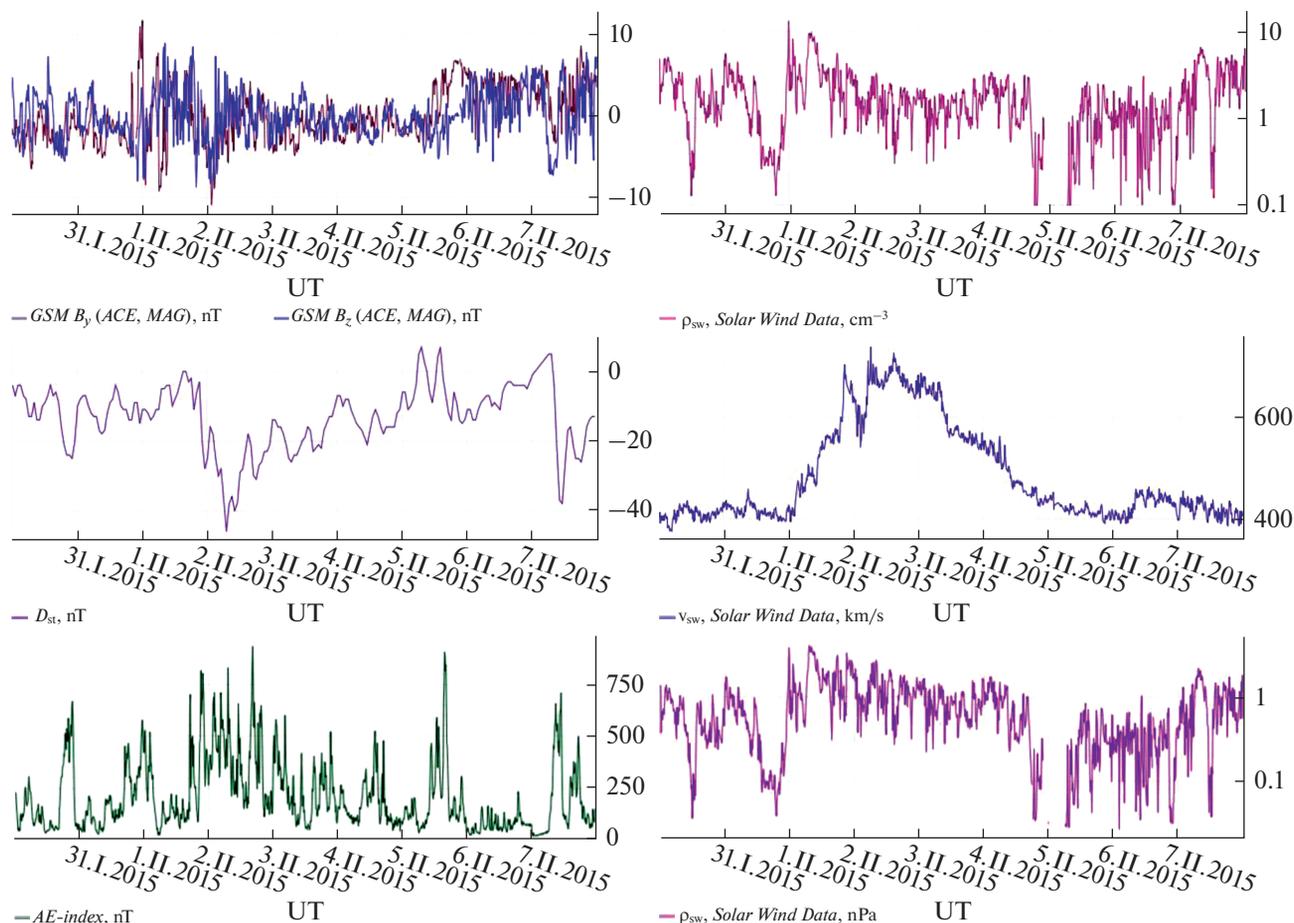


Рис. 5. Параметры магнитного поля и солнечного ветра в период с 30.1 по 7.11.2015.

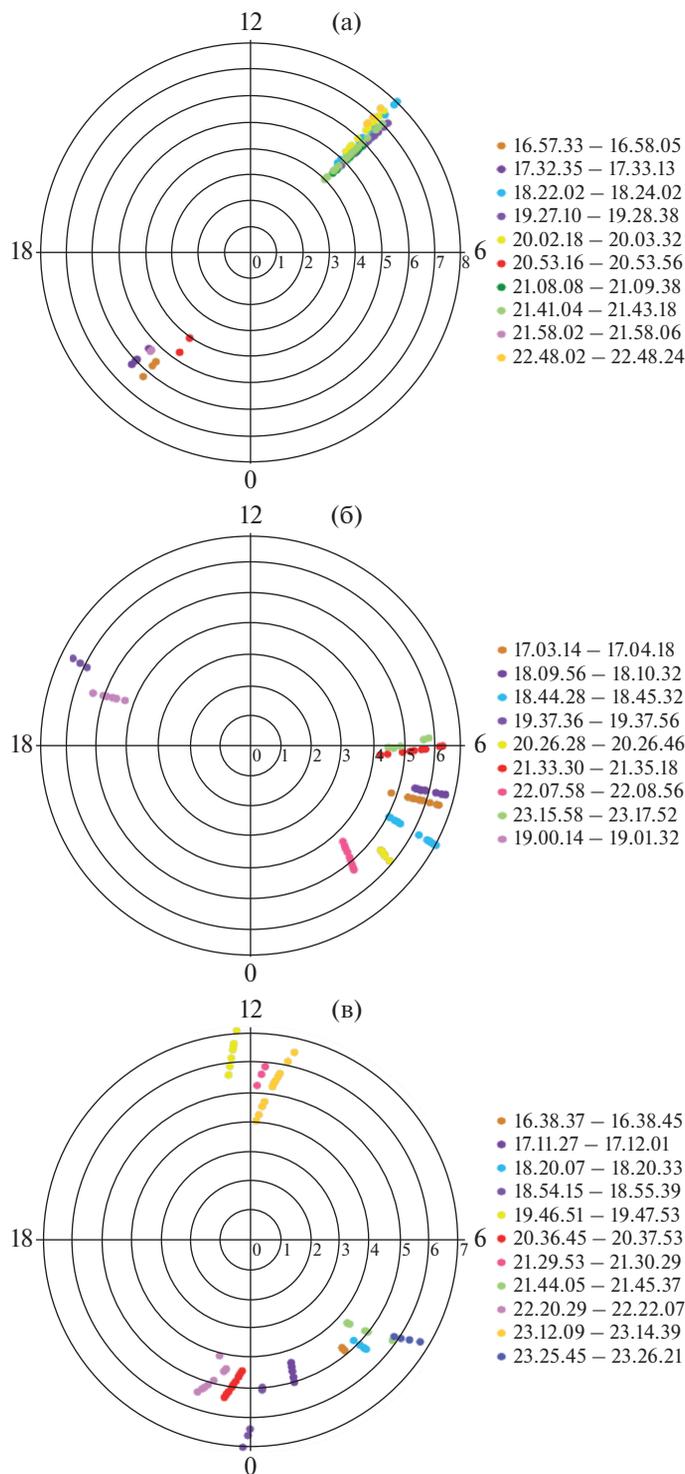
видеть, что высыпания, главным образом, инициированы процессами в предполуденном секторе. Полученные на разных витках спутника данные свидетельствуют о вероятной продолжительности события, зарегистрированного в ходе аэростатного эксперимента, а также о радиальных размерах, но не позволяют судить о его азимутальной протяженности. Для этого требуются данные измерений других спутников с траекториями, расположенными в других секторах локального времени.

Источниками дополнительной информации были выбраны КА *POES-18* и *POES-19*, которые обеспечили максимальный разброс по значениям MLT. На нижних графиках рис. 6б, 6в представлены координаты источников высыпаний в послеполуночном и утреннем секторах 1.11.2015. Можно видеть, что первые высыпания зарегистрированы в период 16.30–17.00 UT, когда началось геомагнитное возмущение.

По данным *Метеор M2* событие началось в 16.57 UT 1.11.2015. Первое наблюдение высыпаний произошло в южном полушарии на MLT = 21.3. Поток электронов с энергиями от 100 кэВ, зарегистрированные вертикальным детектором, приоб-

рели значения  $5540 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . На следующем пролете спутника (17.32–17.33) уже над северным полушарием наблюдаются высыпания электронов тех же энергий, на близких MLT = 20.95, значения величин “вертикальных” потоков электронов увеличились ( $7820 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ ). На рис. 7а приведено первое наблюдение высыпаний в предполуночном секторе. Можно видеть изотропизацию потоков 100 кэВ электронов на  $L = 5.5$  и  $L = 7$ . Высыпания имеют радиально-локализованную структуру.

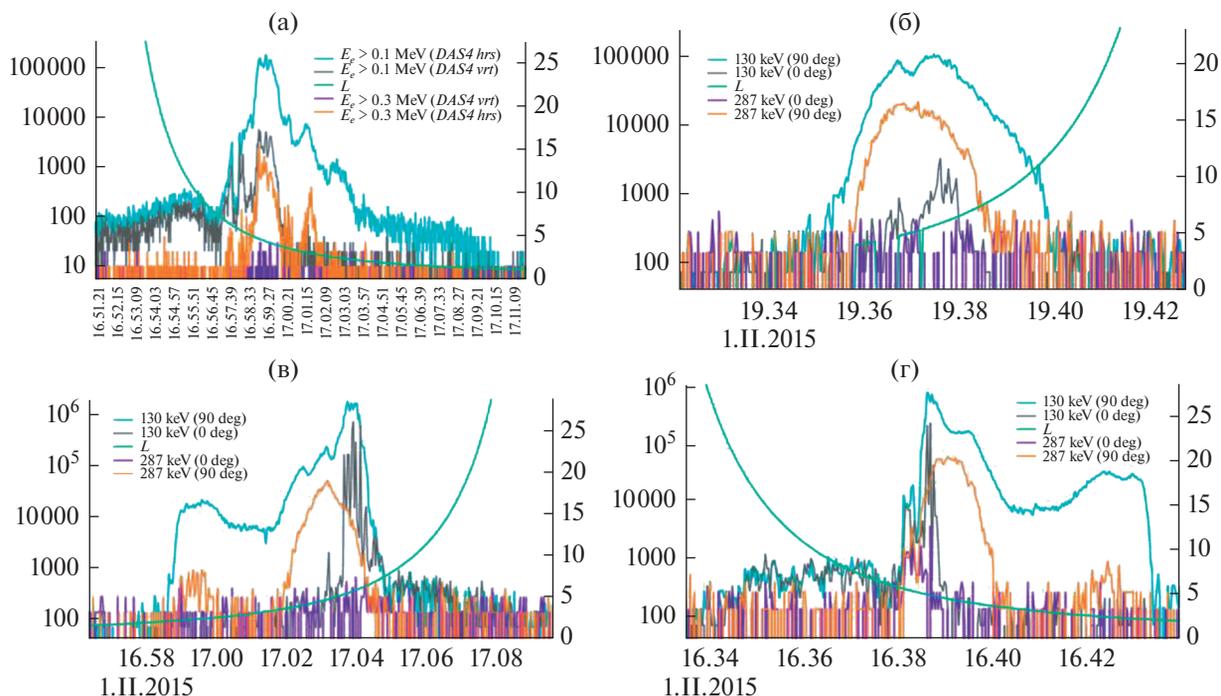
Дальнейшие пролеты спутника показали, что высыпания происходили также и при утренних значениях MLT ( $\sim 9$ ), причем именно в утреннем секторе события имели наиболее интенсивный характер, происходили с большей частотой (практически непрерывно одно за другим), имеют обширную область распространения ( $L = 4–7$ ), значения величин потоков имеют порядок сотен тысяч  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . В то же время, в вечернем секторе наблюдаются разреженные единичные события, которые занимают меньшую область:  $L = 4–6.5$ , значения величин потоков порядка десятков тысяч  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . Это можно наблюдать и



**Рис. 6.** Координаты источников высыпаний электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ 1.И.2015. (а) по данным КА *Метеор М2*, (б) по данным КА *POES-18*, (в) по данным КА *POES-19*.

на рис. 6а: плотность точек в утреннем секторе гораздо выше. При дальнейших пролетах спутника в течение 1.И.2015 мы видим похожую картину высыпаний, как в северном полушарии, так и в южном, при этом потоки высыпающихся частиц возрастают.

Первое наблюдение высыпаний на ИСЗ *POES-18* произошло в 17.03 UT 1.И.2015 (рис. 76). Событие наблюдалось в южном полушарии на  $MLT = 4.8$ ,  $L = 5-6.5$ . Потоки высыпающихся частиц сразу же приняли высокие значения —  $728854 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}$ . В послеполуденных секторах



**Рис. 7.** Потоки электронов. (а) *Memeop M2* первое наблюдение высыпаний (предполуночный сектор). (б) *POES-18* первое наблюдение высыпаний. (в) *POES-18* зарождение высыпаний в вечернем секторе. (г) *POES-19* первое наблюдение высыпаний.

MLT ( $\sim 17$ ) высыпания сначала отсутствовали. Они появились лишь спустя несколько пролетов КА в 19.37 UT (рис. 7в) и имели небольшие значения потоков ( $\sim 3$  тыс.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ ), которые постепенно увеличивались со временем, достигая значений порядка сотен тысяч  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$  2.И.2015 и далее. Для утреннего сектора MLT наблюдаются профили высыпаний, похожие на те, что были зарегистрированы в утреннем секторе ИСЗ *Memeop M2*.

Из рассмотрения данных на ИСЗ *POES-19* было установлено более точное время начала события – 16.38 UT 1.И.2015. Оно впервые было зарегистрировано в южном полушарии на MLT = 2.7,  $L=5.6$  (см. рис. 7г). Как и в “ночных” высыпаниях по данным *Memeop M2* наблюдается пространственная локализация потоков высыпающихся электронов. Их величины достигли значение  $\sim 250$  тыс.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ . На последующих пролетах наблюдались также высыпания и в дневном секторе (MLT  $\sim 12$ ), но менее интенсивные – величина потоков составляла порядка десятков тысяч  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$ . В вечернем секторе 1.И.2015 высыпаний не наблюдалось.

На рис. 8 в координатах  $L$ -MLT представлена пространственная структура областей в приэкваториальной магнитосфере – источников высыпаний энергичных электронов во время возмущенного периода 1–6.И.2015, построенная по дан-

ным трех ИСЗ: *Memeop M2*, *POES-18* и *POES-19*. Можно видеть (рис. 8а) что к вечеру 1.И.2015, в начальный период возмущений область высыпаний захватила, главным образом утренний, ночной и, отчасти, дневной сектора. Также, появились первые высыпания на послеполуночных MLT.

На рис. 8б представлена карта высыпаний на главной фазе геомагнитного возмущения. Можно видеть, что высыпания захватили почти все сектора магнитосферы и регистрируются в широком диапазоне  $L$  (от 4 до 7) и на всех долготах.

Событие закончилось утром 6.И.2015. К этому времени потоки высыпающихся электронов стали более локализованными по  $L$ , а величина потоков понизилась и достигла значений порядка 10 тыс.  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{ср}^{-1}$  в конце события. На графике (рис. 8в) представлено распределение источников высыпаний по данным трех спутников по MLT и  $L$  за период от 00.00 по 14.26 UT 6.И.2015. Из этого графика видно, что занимаемая область высыпаний охватывает все MLT, но событий наблюдалось значительно меньше, они располагаются на более удаленных MLT  $> 5$  и носят более “изолированный характер”.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По данным о параметрах солнечного ветра и межпланетного магнитного поля установлено, что

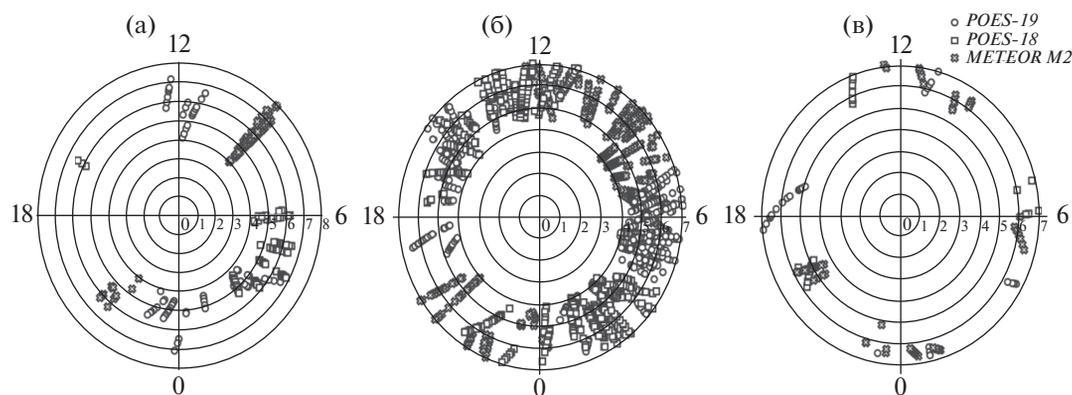


Рис. 8. Координаты источников высыпаний по данным трех спутников. (а) 1.11.2015 – начало события, (б) 2.11.2015, (в) 6.11.2015 – конец события.

высыпания электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ и выше происходили в геомагнитно-возмущенной магнитосфере. Наблюдения спутников позволили приблизительно определить начало события (16.38 UT 1.11.2015) и пространственно-временные характеристики области высыпаний в течение всего периода магнитосферных возмущений.

Обобщая данные наблюдений трех полярных ИСЗ, можно сделать вывод о том, что на начальном этапе возмущения высыпания развивались на  $L > 5$  в ночном секторе MLT и имели изолированный характер. Потoki электронов составляли сотни тысяч  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{sr}^{-1}$ . Постепенно высыпания перешли на утреннюю область магнитосферы и, на главной фазе геомагнитного возмущения, заполнили весь сектор 0–12 MLT. Профили высыпаний отличались от высыпаний в ночной магнитосфере. Они имели вид множественных всплесков на относительно широком интервале  $L$  от 4 до 7.

На главной фазе и начальной стадии фазы восстановления (2.11.2015) высыпания заняли и дневной, и вечерний сектора, таким образом, охватив все значения MLT, но в вечернем секторе высыпания имели более “спокойный” характер, потоки частиц составляли величину порядка десяти тысяч  $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{sr}^{-1}$ . Можно утверждать, что в ходе баллонного эксперимента 2.11.2015 наблюдалось рентгеновское тормозное излучение, связанное именно с этими потоками электронов.

По положению и характеру высыпаний можно сделать предположение о том, что механизмы ускорения и рассеяния частиц имели разную природу в разных областях магнитосферы. Высыпания в ночной магнитосфере имели изолированный, радиально-локализованный характер на относительно высоких широтах ( $L > 5$ ). По-видимому, эти события связаны с рассеянием электронов в сильно-искривленном магнитном поле геомагнитного хвоста и могут быть отнесены к “Группе 1” высы-

паний по классификации [8]. Генерация таких высыпаний связана с приближением токового слоя хвоста магнитосферы во время геомагнитного возмущения. Высыпания в секторе с MLT в диапазоне от 0 до 12 связаны с генерацией ОНЧ-волн: авроральных хорв и свистов (wistler mode chorus), — которые обуславливают, как ускорение электронов, так и рассеяние их в конус потерь [19].

Падение  $Dst$ -индекса до значения  $-46$  нТл и отрицательное значение  $B_z$ -компоненты магнитного поля указывает на развитие умеренной геомагнитной бури, на фазе восстановления которой и наблюдались основные высыпания электронов. Вариации  $AE$ -индекса в момент, когда  $B_z$ -компонента ММП приняла южное направление, и значения  $AE$ -индекса порядка сотен нТл в период начала и на фазе восстановления бури указывают на последовательность суббурь, которые послужили причиной рассеяния высокоэнергичных электронов в конус потерь и дальнейших высыпаний в атмосферу в секторе от 0 до 12 MLT, что является важным фактором для появления ОНЧ-хорв и других низкочастотных волн в авроральной магнитосфере [20]. Также суббури привели к генерации электромагнитных экваториальных шумов и шипений (ОНЧ) в послеполуденном секторе, ответственных за высыпания на дневных и вечерних MLT. Высыпания имели широкую протяженность по MLT и максимум вероятности наблюдения в ночные и утренние часы. Согласно классификации высыпаний электронов в работах [8, 21] ночные высыпания принадлежат первому типу. Высыпания в утреннем секторе, по-видимому, связаны с множественными суббуревыми активациями на главной фазе бури и последующем рассеянии частиц в конус потерь [20].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью данных ИСЗ серий *POES* и *Meteor* был проведен пространственно-временной

анализ и рассмотрена динамика события 1–6.11.2015 высыпаний электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 0.7 МэВ в атмосферу Земли, соответствующего событию 2.11.2015 из базы данных ФИАН. Установлена связь между данными о потоках частиц и данными магнитного поля и солнечного ветра, которая позволила сделать предположение о механизмах возникновения высыпаний и объяснить их наблюдаемую динамику, а также классифицировать данное событие.

Работа поддержана грантом РФФИ (№ 19–05–00960).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thorne R.M.* Radiation belt dynamics: The importance of wave-particle interactions // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. Is. 22.
2. *Baker D.N., Erickson P.J., Fennell J.F. et al.* Space weather effects in the Earth's radiation belts // *Space Science Reviews.* 2018. V. 214. № 17. Article number 17. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7>
3. *Wu H., Chen T., Kalegaev V.V., Panasyuk M.I., Vlasova N.A., Duan S.* Long-term dropout of relativistic electrons in the outer radiation belt during two sequential geomagnetic storms // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2020. V. 125. № 10. <https://doi.org/10.1029/2020JA028098>
4. *Horne R.B., Thorne R.M.* Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 15. P. 3011–3014.
5. *Lazutin L.L., Dmitriev A.V., Suvorova A.V.* Electron radiation belt dynamics during magnetic storms and in quiet time // *Solar-Terrestrial Physics.* 2018. V. 4. № 1. P. 59–71.
6. *Shprits Y.Y., Thorne R.M., Friedel R. et al.* Outward radial diffusion driven by losses at magnetopause // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A11214. <https://doi.org/10.1029/2006JA011657>
7. *Blum L.W., Breneman A.W.* Observations of radiation belt losses due to cyclotron wave-particle interactions. Loss in the Magnetosphere to Particle Precipitation in the Atmosphere. Amsterdam: Netherlands Elsevier, 2020.
8. *Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V. et al.* Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2016. V. 121. P. 46–50. <https://doi.org/10.1002/2016JA022765>
9. *Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A. et al.* Timescale for radiation belt electron acceleration by whistler mode chorus waves // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. P. A03225. <https://doi.org/10.1029/2004HA010811>
10. *Ukhorskiy A.Y., Anderson B.J., Brandt P.C., Tsyganenko N.A.* Storm time evolution of the outer radiation belt: transport and losses // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2006. V. 111. P. A11S03. <https://doi.org/10.1029/2006JA011690>
11. *Тверской Б.А.* Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968.
12. *Основы теоретической космофизики. Избранные труды.* М.: УРСС, 2004.
13. *Meredith N.P., Horne R.B., Lam M.M. et al.* Energetic electron precipitation during high-speed solar wind stream driven storms // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. A05223. <https://doi.org/10.1029/2010JA016293>
14. *Shprits Y.Y., Subbotin D.A., Meredith N.P., Elkington S.* Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: local acceleration and losses // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. V. 70. P. 1694–1713. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.06.014>
15. *Xiao F., Chang Yang, Zhaoguo He et al.* Chorus acceleration of radiation belt relativistic electrons during March 2013 geomagnetic storm // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. V. 119. P. 3325–3332. <https://doi.org/10.1002/2014JA019822>
16. *Лазутин Л.Л.* Рентгеновское излучение авроральных электронов и динамика магнитосферы. Ленинград: Наука, 1979.
17. *Makhmutov V.S., Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I. et al.* Catalogue of electron precipitation events as observed in the long-duration cosmic ray balloon experiment // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2016. V. 149. P. 258–276.
18. *Базилевская Г.А., Калинин М.С., Крайнев М.Б. и др.* Высыпания магнитосферных электронов в атмосферу Земли и электроны внешнего радиационного пояса // *Известия РАН. Серия физическая.* 2017. Т. 81. № 2. С. 235–238.
19. *Omura Y., Nunn D., Summers D.* Generation processes of whistler-mode chorus emissions: Current status of nonlinear wave growth theory. Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere. Washington: American Geophysical Union, 2012.
20. *Tsurutani B.T. et al.* Are high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA) events substorm expansion events? // *J. Atmospheric and Solar-terrestrial physics.* 2004. V. 66. № 2. P. 167–176.
21. *Яхнина Т.А., Яхнин А.Г., Семенова Н.В.* Связь высыпаний релятивистских электронов с геомагнитной активностью. Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity. 2015. P. 75–78.

УДК 550.388.2

## О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ПЕРИОД СЛОЖНОГО ГЕЛИО-ГЕОФИЗИЧЕСКОГО СОБЫТИЯ В СЕНТЯБРЕ 2017 ГОДА

© 2021 г. М. В. Клименко<sup>1,2,\*</sup>, В. В. Клименко<sup>1</sup>, Ф. С. Бессараб<sup>1</sup>, А. В. Тимченко<sup>1,3</sup>, И. А. Миронова<sup>2</sup>, Е. В. Розанов<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>4</sup>Физико-метеорологическая обсерватория Давос, Давос, Швейцария

\*maksim.klimenko@mail.ru

Поступила в редакцию 05.03.2021 г.

После доработки 02.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В работе представлены результаты модельных расчетов поведения ионосферы в период сложного события космической погоды, которое произошло в сентябре 2017 г. Основное внимание уделено анализу отклика интегральной характеристики ионосферы – Глобального электронного содержания (ГЭС) на геомагнитные бури 7–8.IX. Сравнение временного поведения модельного и экспериментального ГЭС показало хорошее качественное соответствие временных вариаций ГЭС, связанных с геомагнитными бурями. В то же время, отмечается отсутствие в результатах модельных расчетов положительных возмущений ГЭС, наблюдавшихся 7, 8 и 11.IX. Предполагается, что эти положительные возмущения ГЭС в указанные дни могут быть связаны с наблюдавшимися, но не учтенными в модельных расчетах солнечными протонными событиями и высыпаниями протонов из магнитосферы.

DOI: 10.31857/S0023420621060042

### ВВЕДЕНИЕ

Предыдущие исследования ионосферного отклика на геомагнитные бури показали, что даже в случае изолированных бурь, произошедших в одни и те же сезоны и приблизительно в одно и то же время суток, ионосферные отклики могут существенно отличаться друг от друга [1, 2]. Причиной таких отличий могут являться ионосферные возмущения, связанные с явлениями, происходящими в нижней и средней атмосфере [3–6], а также с различными явлениями космической погоды (солнечными затмениями, вспышками и т.д.) [7, 8]. Солнечные вспышки и солнечные протонные события чаще всего предшествуют геомагнитным бурям, а в периоды повышенной активности Солнца они могут наблюдаться одновременно с геомагнитными бурями [7, 9, 10]. В данной статье будет рассмотрен ионосферный отклик на сложное гелио-геофизическое событие в сентябре 2017 г., включающее в себя геомагнитные бури, солнечные вспышки различных классов и солнечные протонные события.

В качестве характеристики ионосферного отклика на указанное сложное явление космиче-

ской погоды мы рассмотрели возмущения полного электронного содержания (ПЭС). ПЭС является одним из наиболее важных и часто используемым ионосферным параметром, представляющим собой проинтегрированную от поверхности Земли до высоты пролетов спутников Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) электронную концентрацию в вертикальном столбе единичной площади. На основе данных глобальных ионосферных карт ПЭС может быть рассчитано глобальное электронное содержание. ГЭС эквивалентно общему числу электронов в ионосфере Земли до высот орбит навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС (~20000 км) [11]. Впервые данный параметр был предложен в работе [12], а идея его использования в геофизических исследованиях и метод расчета ГЭС были представлены в [13]. Проведенные исследования показали, что вариации глобального электронного содержания хорошо коррелируют с динамикой УФ-излучения Солнца [12]. В работах [14, 15] был получен отклик глобального электронного содержания на геомагнитные бури. Было показано, что глобальное электронное содержание превышает

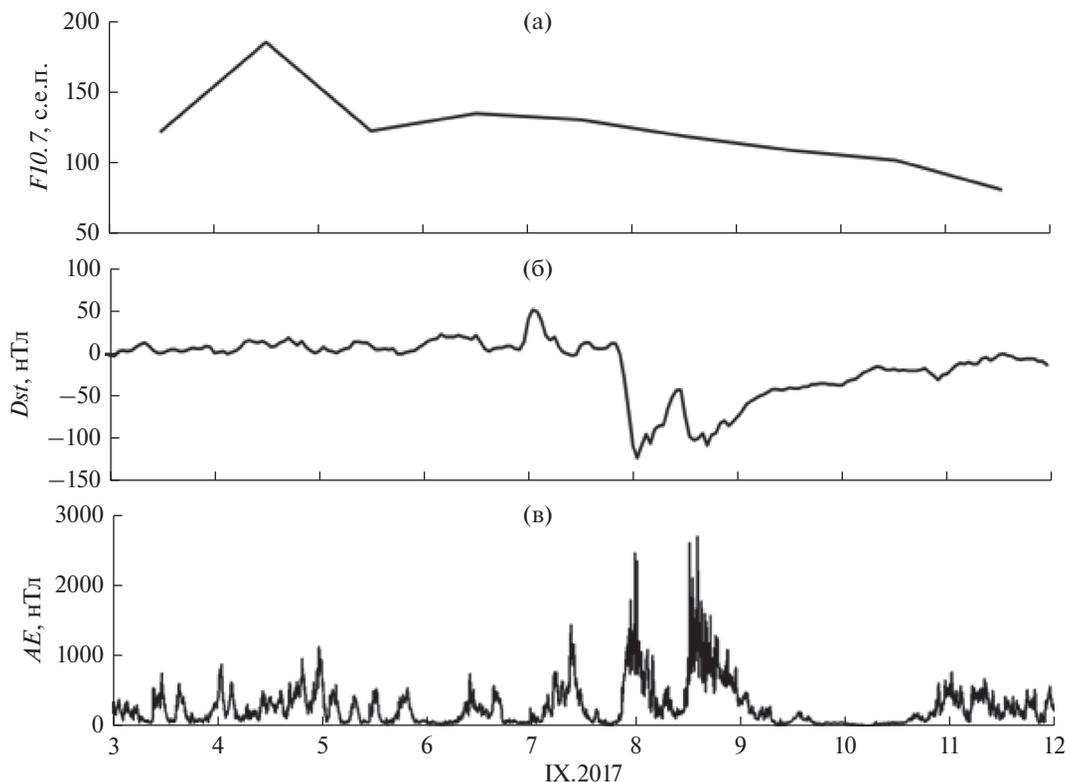


Рис. 1. Временной ход индексов солнечной и геомагнитной активности.

фоновые значения в течении  $\sim 24$  ч на 10–20%, после чего возникает отрицательная фаза с пониженными на 10–20% значениями ГЭС в течение  $\sim 40$  ч на фазе восстановления. Chen et al. [16] показали значимую корреляцию (более 0.8) отклика глобального электронного содержания на слабую геомагнитную возмущенность в условиях глубокого минимума солнечной активности 2007–2009 гг., притом, что в 2003–2005 гг. во время сильных геомагнитных бурь корреляция отклика ГЭС и индекса  $Ap$  на малых временных масштабах (несколько часов) практически отсутствовала. Статистический анализ показал, что детерминированная и случайная компоненты отклика глобального электронного содержания на геомагнитные бури примерно равны [17]. Это можно частично объяснить наличием других явлений космической погоды, предшествующих и/или сопровождающих геомагнитные бури. Данная статья представляет собой попытку рассмотреть отклик ГЭС на целый комплекс событий космической погоды (солнечные вспышки, солнечные протонные события и геомагнитные бури), которые имели место в сентябре 2017 г.

#### ГЕЛИО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА

На рис. 1 показано поведение индексов солнечной ( $F10.7$ ) (а) и геомагнитной ( $Dst$ ,  $AE$ ) (б и в, соответственно) активности 3–11.IX.2017. Видно, что в этот период имели место две геомагнитные бури: 7 и 8.IX. Во время первой бури  $Dst$  и  $AE$  ин-

дексы достигали своих экстремальных значений –130 и 2600 нТл, соответственно. Во время второй бури экстремальные значения  $Dst$  и  $AE$  достигали, соответственно, –120 и 2800 нТл. Следует отметить, что этим двум бурям предшествовал довольно продолжительный относительно спокойный геомагнитный период 3–6.IX.2017, в течение которого, однако, имели место значительные изменения индекса солнечной активности  $F10.7$ . Изменения индекса  $F10.7$  4–6.IX были связаны с целым набором солнечных вспышек  $M$  и  $X$  класса, произошедших за рассматриваемый период и характеризующихся увеличением потоков рентгеновского излучения (смотри рис. 2). Кроме сильных геомагнитных бурь и солнечных вспышек за рассматриваемый период были зарегистрированы увеличения потоков солнечных и магнитосферных протонов различных энергий в периоды 5, 6–8 и 10–11.IX (смотри рис. 2). Анализ солнечной и геомагнитной обстановки показал, что 6–7.IX, а также 10–11.IX.2017 после вспышек и выбросов корональных масс были зафиксированы высыпания в основном солнечных протонов. В остальной период времени (7–9.IX.2017) появление высыпаний протонов связано с геомагнитными возмущениями. На рис. 2 показаны только выборочные интегральные энергии потоков протонов, зафиксированные  $GOES 15$ . Измерения частиц, детектируемых каналами  $MAGPD/MAGED GOES$  с энергиями от 80 кэВ, требуют дополнительной ка-

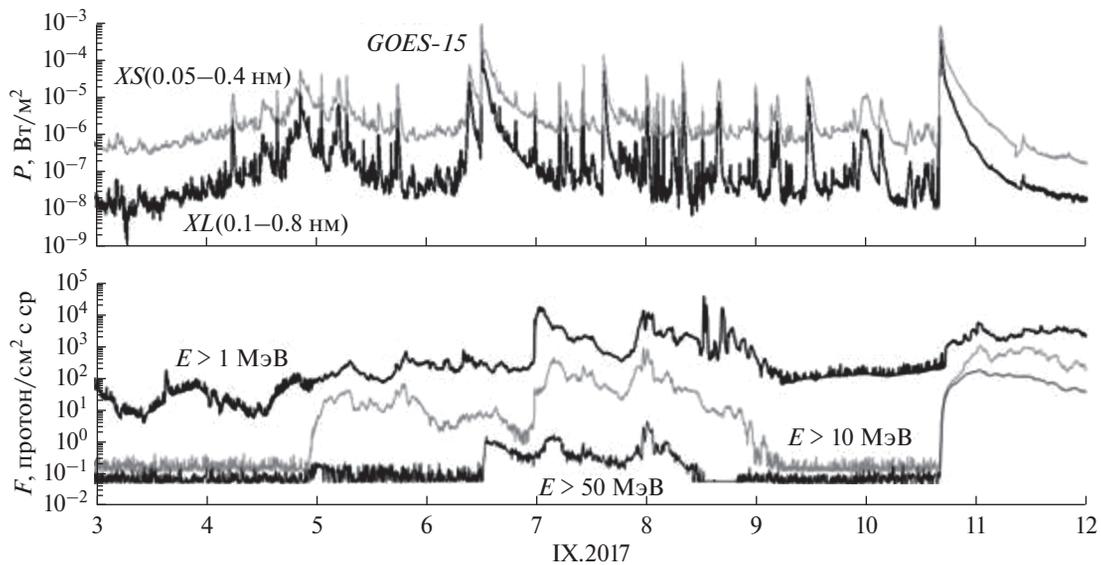


Рис. 2. Временные вариации потоков рентгеновского излучения (в двух полосах) и потоков протонов различных энергий.

либровки, что выходит за рамки данной статьи. Только 3.IX при относительно спокойной геомагнитной активности солнечные вспышки не наблюдались, что и определило выбор фоновых значений рассматриваемых ионосферных параметров перед бурями именно за этот день. Итак, в данном исследовании рассматривались ионосферные возмущения, связанные с изменениями индекса  $F10.7$  и геомагнитными бурями, в период с 4 по 11.IX.2017.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

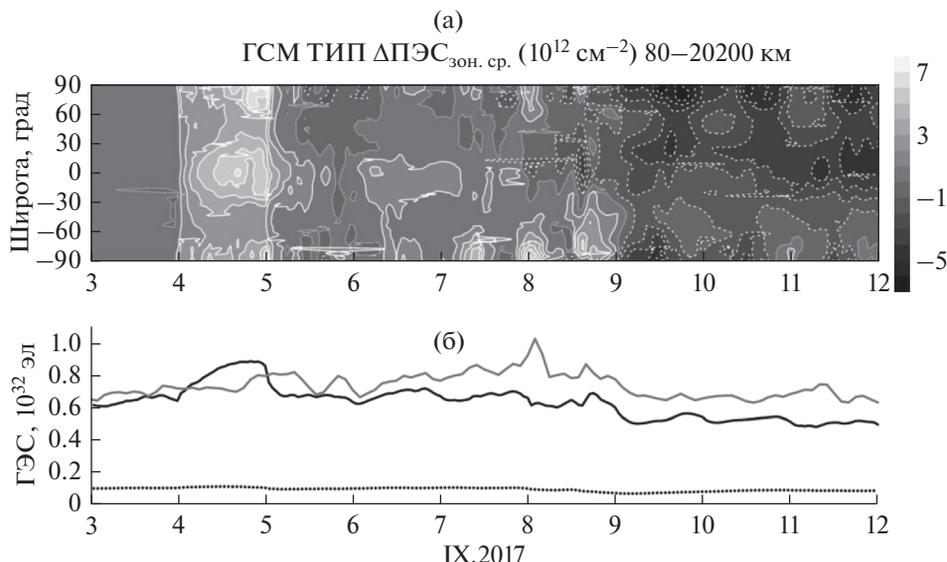
В этом исследовании расчеты проводилось на основе Глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП) [18, 19]. В модели ГСМ ТИП осуществляется численное интегрирование системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральной и заряженной компонент многокомпонентной смеси газов, а также трехмерного уравнения, описывающего закон сохранения полного тока в ионосфере. В качестве параметров, определяющих воздействие геомагнитных возмущений на верхнюю атмосферу, в модели ГСМ ТИП используются разность потенциалов через полярные шапки, продольные токи второй зоны и высыпания высокоэнергичных электронов в авроральной области. Разность потенциалов через полярные шапки  $\Delta\Phi$  в данных расчетах задавалась на основе ее эмпирической зависимости от индекса геомагнитной активности  $AE$  [20]. Потенциал на геомагнитных широтах  $\pm 75^\circ$  задавался изменяющимся по гармоническому закону относительно местного магнитного времени с максимумом на утренней и минимумом на вечерней стороне. При этом не учитывались изменения размеров полярных шапок и, следовательно, положения ее эква-

ториальной границы во время возмущений. Величина продольных токов второй зоны задавалась согласно [21]. Положение максимумов продольных токов второй зоны, вытекающих на утренней стороне и втекающих на вечерней стороне, задавалось согласно Sojka et al. [22] в зависимости от задаваемой разности потенциалов через полярные шапки на геомагнитных широтах от  $\pm 65^\circ$  при  $\Delta\Phi \leq 40$  кВ до  $\pm 35^\circ$  при  $\Delta\Phi > 200$  кВ. Кроме того, согласно [23], учитывалась 30-минутная временная задержка вариаций токов второй зоны относительно вариаций разности потенциалов через полярные шапки. Высыпания авроральных электронов рассчитывались по модели [24], разработанной в Полярном геофизическом институте КНЦ РАН. Потоки солнечного КУФ-излучения рассчитывались в соответствии с моделью, предложенной Нусиновым и Бруевич [25], зависящей от среднесуточного значения индекса  $F10.7$ .

Следует отметить, что за рассматриваемый период времени наблюдалось несколько солнечных вспышек различного класса. Однако, при рассмотрении возмущений ГЭС и среднезональных значений ПЭС с двухчасовым временным разрешением эффектами солнечных вспышек можно пренебречь из-за их кратковременности и привязки исключительно к дневному времени суток. Также в модельных расчетах не учитывались эффекты потоков протонов различных энергий. Для сравнения полученных результатов модельных расчетов с данными наблюдений мы использовали временные вариации ГЭС, взятые с сайта <https://simurg.iszf.irk.ru/>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования глобального ионосферного отклика на сложное явление космической погоды



**Рис. 3.** Временное развитие ионосферных параметров: (а) широтные профили возмущений среднезонального ПЭС, рассчитанные по модели ГСМ ТИП (пунктирными линиями отмечена смена знака возмущения); (б) глобальное электронное содержание по данным наблюдений (серая линия) и результатам расчетов модели ГСМ ТИП (черная линия). Пунктирной кривой показано плазмосферное электронное содержание, рассчитанное в модели ГСМ ТИП.

в период с 3 по 11.IX.2017 нами были рассмотрены рассчитанные в модели ГСМ ТИП временные вариации ГЭС и широтные распределения возмущений среднезональных значений ПЭС (рис. 3). Из временного поведения широтных профилей среднезональных значений возмущений ПЭС видно, что: 1) в течении всех суток 4.IX формируются значительные положительные возмущения ПЭС с максимумом на экваторе; 2) в периоды главных фаз геомагнитных бурь 7 и 8.IX имели место высокоширотные положительные возмущения среднезональных ПЭС; 3) в период с 9 по 11.IX формируются отрицательные возмущения ПЭС с наибольшими возмущениями в северном полушарии.

На рис. 3, кроме рассчитанной по модели ГСМ ТИП временной изменчивости ГЭС (ГЭС<sub>м</sub>) представлено также временное развитие ГЭС по данным наблюдений (ГЭС<sub>э</sub>). Сравнение результатов расчетов модели ГСМ ТИП с данными наблюдений выявляет как сходства, так и различия. Из сходств модельных и наблюдаемых временных изменений ГЭС можно выделить: 1) общий характер изменений ГЭС<sub>м</sub> и ГЭС<sub>э</sub> за рассматриваемый период и, особенно, нисходящий тренд после 8.IX, связанный с похожим трендом в поведении потоков солнечного КУФ, который виден в вариациях индекса  $F10.7$  (рис. 1а); 2) хорошее соответствие изменений ГЭС<sub>м</sub> и ГЭС<sub>э</sub> в период 8–9.IX (особенно хочется выделить временной интервал второй половины 8.IX, который характеризовался наибольшими изменениями ГЭС, связанными с геомагнитной бурей). Во второй половине 8.IX во время второй геомагнитной бури формируется заметный положительный эффект в ГЭС, сменя-

ющийся продолжительным сильным отрицательным эффектом. Такое поведение ГЭС соответствует морфологическим представлениям его поведения во время геомагнитной бури [16].

Основными различиями модельных и наблюдаемых временных изменений ГЭС являются: 1) несовпадение по времени роста ГЭС<sub>м</sub> и ГЭС<sub>э</sub> 4.IX, которое легко объясняется тем, что в модели в течение всего этого дня задавался один и тот же наивысший уровень солнечной активности ( $F10.7 = 185$ ), тогда как в реальности, согласно информации, взятой с сайта [https://tesis.lebedev.ru/en/sun\\_flares.html](https://tesis.lebedev.ru/en/sun_flares.html), и по данным *GOES-15* (см. рис. 2), солнечные вспышки наблюдались во второй половине 4.IX; 2) отсутствие в модельных расчетах значительных положительных возмущений ГЭС, наблюдавшихся 5–8 и 11.IX.

Более слабый положительный эффект в ГЭС может быть вызван различными причинами. Ранее, в работе [10] мы исследовали ионосферные эффекты протонных событий и высыпаний магнитосферных протонов с помощью модели всей атмосферы EAGLE и показали, что протонные высыпания вызывают преимущественно положительные возмущения ПЭС, в том числе, и на экваторе, что может приводить к положительным возмущениям ГЭС. В рассматриваемых в настоящей работе результатах численных экспериментов, которые проводились на основе модели ГСМ ТИП, эффекты солнечных протонных событий и магнитосферных протонных высыпаний не учитывались. Таким образом, полученные нами отличия в вариациях экспериментального и модельного ГЭС, могут являться косвенным доказательством важности учета протонных высыпаний

в модельных расчетах для воспроизведения положительных ионосферных возмущений во время геомагнитных бурь, сопровождаемых солнечными протонными событиями. В пользу этого предположения говорит то, что наблюдаемые максимумы положительных возмущений ГЭС 7, 8, и 11.IX (отсутствующие в результатах расчетов по модели ГСМ ТИП) (рис. 3) формируются в эти дни в течение 3–6 ч после максимумов протонных высыпаний с энергиями больше 1 МэВ (рис. 2). Следует отметить, что данный вывод требует проверки, которую можно будет осуществить с помощью модели всей атмосферы EAGLE [10, 26] при учете протонных высыпаний.

Согласно результатам различных исследований вклад плазмосферы в ПЭС зависит от солнечной активности, сезона, широты, и момента местного времени [27–30]. Вклад плазмосферы в ПЭС на низких широтах в минимуме солнечной активности может достигать 40–50% [28, 29]. В последние годы стал широко подниматься вопрос об изменении вклада плазмосферы в ПЭС во время геомагнитных бурь [31–34]. Было, например, показано, что отклик в foF2 и ПЭС над одной и той же точкой в одно и то же время может отличаться по знаку возмущений за счет различного характера возмущений в ионосфере и плазмосфере [32–34]. Интерес представляет вклад плазмосферы в глобальное электронное содержание и изменение плазмосферного глобального электронного содержания во время геомагнитной бури. Для исследования данного вопроса, нами был получен плазмосферный (от 1000 до 20000 км) ГЭС по результатам расчетов модели ГСМ ТИП (смотри рис. 3). Видно, что в рассматриваемый период средней солнечной активности плазмосфера вносит вклад до ~15% в ГЭС в спокойных геомагнитных условиях. Можно отметить, что плазмосферный ГЭС по сравнению с полным ГЭС слабее реагирует на повышение солнечной активности во время солнечных вспышек. Также видно, что геомагнитные бури 7–9.IX в целом приводят к уменьшению плазмосферного и полного ГЭС. При этом вариативность полного ГЭС значительно больше вариативности плазмосферного ГЭС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты исследования отклика глобального электронного содержания на сложное событие космической погоды (включающее солнечные вспышки, солнечные протонные события и геомагнитные бури), которое произошло 4–11.IX.2017. Показано, что эффекты геомагнитной бури 8–9.IX соответствуют морфологическим представлениям отклика ГЭС на геомагнитные возмущения и успешно воспроизводятся моделью системы термосфера-ионосфера. В то же время, отмечается отсутствие в результатах модельных расчетов, наблюдаемых 7, 8

и 11.IX положительных возмущений ГЭС. Предполагается, что эти положительные возмущения ГЭС могут быть связаны с наблюдаемыми, но не учтенными в модельных расчетах солнечными протонными событиями и высыпаниями протонов из магнитосферы. За рассматриваемый период средней солнечной активности плазмосфера вносит вклад до ~15% в ГЭС в спокойных геомагнитных условиях. Геомагнитные бури 7–9.IX в целом приводят к уменьшению плазмосферного и полного ГЭС. При этом вариативность полного ГЭС значительно больше вариативности плазмосферного ГЭС.

Исследование экстремального события космической погоды выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 20-67-46016 (И.А. Миронова, М.В. Клименко). Численное моделирование и интерпретация ионосферного отклика на геомагнитные бури и повышение солнечной активности выполнено при поддержке гранта РНФ 21-17-00208 (В.В. Клименко, Ф.С. Бессараб, А.В. Тимченко, Е.В. Розанов).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 32–42. <https://doi.org/10.12737/stp-44201804>
2. Ratovsky K.G., Klimenko M.V., Yasyukevich Y.V. et al. Statistical Analysis and Interpretation of High-, Mid- and Low-Latitude Responses in Regional Electron Content to Geomagnetic Storms // Atmosphere. 2020. V. 11. P. 1308. <https://doi.org/10.3390/atmos11121308>
3. Fuller-Rowell T., Akmaev R., Wu F. et al. Did the January 2009 sudden stratospheric warming cool or warm the thermosphere? // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. L18104. <https://doi.org/10.1029/2011GL048985>
4. Goncharenko L., Chau J.L., Condor P. et al. Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high solar activity: Case study of January 2013 // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 4982–4986. <https://doi.org/10.1002/grl.50980>
5. Laskar F.I., Pallamraju D., Lakshmi T.V., Veenadhari B. Vertical coupling of atmospheres: dependence on strength of sudden stratospheric warming and solar activity // Earth, Planets and Space. 2014. V. 66. P. 66–94. <https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-94>
6. Ясюкевич А.С., Клименко М.В., Куликов Ю.Ю. и др. Изменения параметров средней и верхней атмосферы во время внезапного стратосферного потепления в январе 2013 г. // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 4. С. 5–16. <https://doi.org/10.12737/szf-43201801>
7. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Ratovsky K.G. et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // Radio Sci. 2011. V. 46. № RS0D03. <https://doi.org/10.1029/2010RS004590>

8. *Hoque M., Wenzel M., Jakowski D.N. et al.* Ionospheric response over Europe during the solar eclipse of March 20, 2015 // *J. Space Weather and Space Climate*. 2016. V. 6. A36. <https://doi.org/10.1051/swsc/2016032>
9. *Qian L., Wang W., Burns A.G. et al.* Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6–11.IX.2017 // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2019. V. 124. P. 2298–2311. <https://doi.org/10.1029/2018JA026175>
10. *Bessarab F.S., Sukhodolov T.V., Klimenko M.V. et al.* Ionospheric response to solar and magnetospheric protons during January 15–22, 2005: EAGLE whole atmosphere model results // *Advances in Space Research*. 2020. V. 67. Is. 1. P. 133–149. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.026>
11. *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V. et al.* Global electron content: a new conception to track solar activity // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. Is. 2. P. 335–344. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-335-2008>
12. *Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В.* Солнечная активность и глобальное электронное содержание // *ДАН*. 2006. Т. 409. № 3. С. 399–402.
13. *Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Oinats A.V. et al.* Dynamics of global electron content in 1998–2005 derived from global GPS data and IRI modeling // *Advances in Space Res.* 2008. V. 42. P. 763. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.11.007>
14. *Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S.* Imaging Global Electron Content backwards in time more than 160 years ago // *Advances in Space Research*. 2014. V. 53. Is. 3. P. 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.036>
15. *Yenen S.D., Gulyaeva T.L., Arikani F., Arikani O.* Association of ionospheric storms and substorms of Global Electron Content with proxy AE index // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56. № 7. P. 1343–1353. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.025>
16. *Chen Y., Liu L., Le H., Wan W.* Geomagnetic activity effect on the global ionosphere during the 2007–2009 deep solar minimum // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2014. V. 119. Is. 5. P. 3747–3754. <https://doi.org/10.1002/2013JA019692>
17. *Ратовский К.Г., Клименко М.В., Ясюкевич Ю.В. и др.* Статистический анализ ионосферного отклика на геомагнитные бури с использованием данных глобальных ионосферных карт // *Химическая физика*. 2020. Т. 39. № 10. С. 57–68.
18. *Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V. et al.* Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // *PAGEOPH*. 1988. V. 127. № 2–3. P. 219–254.
19. *Korenkov Yu.N., Klimenko V.V., Förster M. et al.* Calculated and observed ionospheric parameters for a Magon-2 passage and EISCAT data on July 31, 1990 // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № A7. P. 14697–14710.
20. *Feshchenko E.Yu., Maltsev Yu.P.* Relations of the polar cap voltage to the geophysical activity // *Proc. 26 Annual Seminar – Physics of Auroral Phenomena*. 2003. P. 59–61.
21. *Lukianova R., Christiansen F.* Modeling of the global distribution of ionospheric electric field based on realistic maps of field-aligned currents // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A03213. <https://doi.org/10.1029/2005JA011465>
22. *Sojka J.J., Schunk R.W., Denig W.F.* Ionospheric response to the sustained high geomagnetic activity during the March'89 great storm // *J. Geophys. Res.* 1994. V. 99. № A11. P. 21341–21352.
23. *Kikuchi T., Hasimoto K.K., Nozaki K.* Penetration of magnetospheric electric fields to the equator during a geomagnetic storm // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113. A06214. <https://doi.org/10.1029/2007JA012628>
24. *Vorobjev V.G., Yagodkina O.I.* Empirical model of auroral precipitation power during substorms // *J. Atm. Solar-Ter. Phys.* 2008. V. 70. P. 654–662.
25. *Нусинов А.А., Бруевич Е.А.* Зависимость интенсивности линий коротковолнового солнечного излучения от уровня активности // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1984. Т. 24. С. 529–536.
26. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S. et al.* Identification of the mechanisms responsible for anomalies in the tropical lower thermosphere/ionosphere caused by the January 2009 sudden stratospheric warming // *J. Space Weather and Space Climate*. 2019. V. 9. A39. <https://doi.org/10.1051/swsc/2019037>
27. *Yizengaw E., Moldwin M.B., Galvan D. et al.* Global plasmaspheric TEC and its relative contribution to GPS TEC // *J. Atm. Solar-Ter. Phys.* 2008. V. 70. P. 1541–1548. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.04.022>
28. *Cherniak Iu.V., Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I.* Plasmaspheric electron content derived from GPS TEC and FORMOSAT-3/COSMIC measurements: Solar minimum condition // *Adv. Space Res.* 2012. V. 50. P. 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.002>
29. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Cherniak Iu.V.* The global morphology of the plasmaspheric electron content during Northern winter 2009 based on GPS/COSMIC observation and GSM TIP model results // *Adv. Space Res.* 2015. V. 55. № 8. P. 2077–2085. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.06.02>
30. *Shim J.S., Jee G., Scherliess L.* Climatology of plasmaspheric total electron content obtained from Jason 1 satellite // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. P. 1611–1623. <https://doi.org/10.1002/2016JA023444>
31. *Cherniak Iu.V., Zakharenkova I.E., Dzubanov D., Krankowski A.* Analysis of the ionosphere/plasmasphere electron content variability during strong geomagnetic storm // *Adv. Space Res.* 2014. V. 54. № 4. P. 586–594. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.04.011>
32. *Liu J., Wang W., Burns A. et al.* Profiles of ionospheric storm-enhanced density during the 17 March 2015 great storm // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016. V. 121. P. 727–744. <https://doi.org/10.1002/2015JA021832>
33. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E. et al.* Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // *Ann. Geophys.* 2017. V. 35. P. 923–938. <https://doi.org/10.5194/angeo-35-923-2017>
34. *Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V. et al.* Disturbances of the thermosphere-ionosphere-plasmasphere system and auroral electrojet at 30° E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 180. P. 78–92. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.017>

УДК 550.388.2

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ *NORSAT-1* И *SWARM*

© 2021 г. А. А. Синевич<sup>1, 2, \*</sup>, А. А. Чернышов<sup>1</sup>, Д. В. Чугунин<sup>1</sup>,  
В. Я. Милох<sup>3</sup>, М. М. Могилевский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

<sup>3</sup>Факультет физики, Университет Осло, Осло, Норвегия

\*sinevich.aa@gmail.com

Поступила в редакцию 02.03.2021 г.

После доработки 07.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В настоящей работе изучается пространственная структура поляризационного джета по данным ионосферных спутников *NorSat-1* и *Swarm* во время геомагнитной бури. Проведен сравнительный анализ зависимости концентрации и температуры электронов от инвариантной широты одновременно по измерениям на спутниках *NorSat-1* и *Swarm C* во время пересечения спутниками поляризационного джета. Подтверждена зависимость инвариантной широты поляризационного джета от авроральной геомагнитной активности и от местного магнитного времени. Обнаружена двойная структура поляризационного джета, а также мелкомасштабные пространственные структуры внутри джета размером в  $0.1^{\circ}$ – $0.2^{\circ}$ . Установлено, что пространственные структуры не являются локальными и растянуты по долготе как минимум на 2 ч местного магнитного времени.

DOI: 10.31857/S0023420621060091

### ВВЕДЕНИЕ

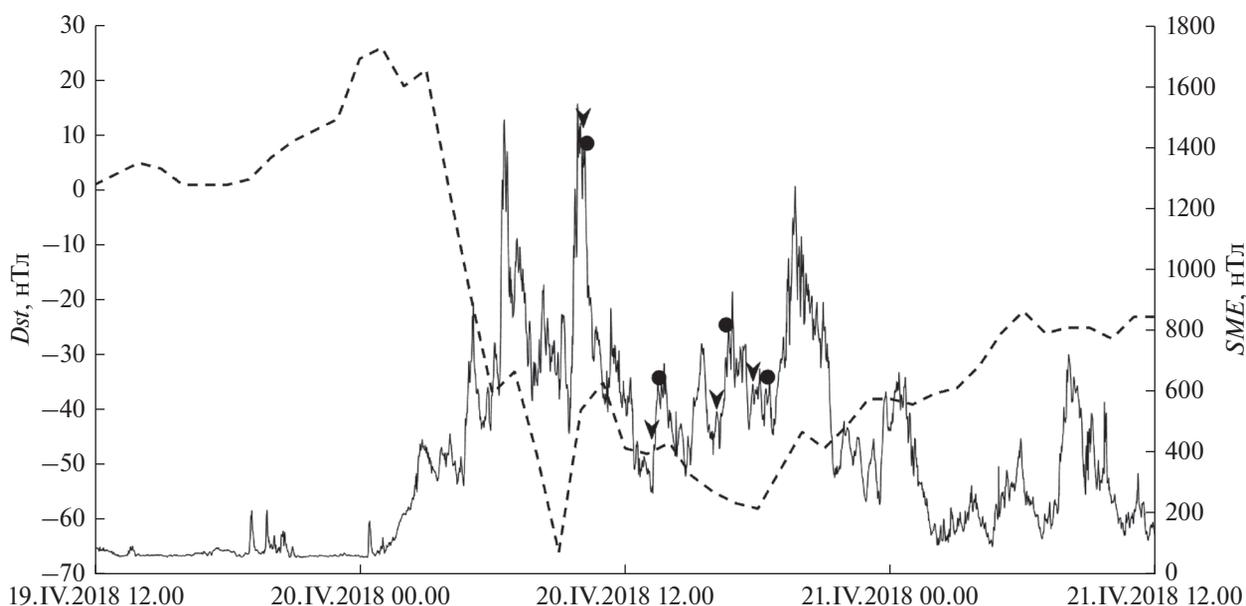
Поляризационный джет (ПД) – явление субавроральной ионосферы, представляющее собой узкий по широте быстрый ионный дрейф в западном направлении вблизи проекции плазмопаузы на высотах ионосферного слоя *F*. Впервые подобное явление было обнаружено по данным спутника *Космос-184* [1, 2] после чего и получило свое название. В англоязычной литературе данное явление наиболее часто называют “субавроральный ионный дрейф” (SAID) [3]. Размер ПД по широте обычно лежит в пределах  $1^{\circ}$ – $2^{\circ}$ , скорость дрейфа ионов на запад составляет от 0.3 до 2.5 км/с и выше, и регистрируется в секторах от 18 до 02 ч местного магнитного времени (MLT). Наибольшие значения скорости дрейфа ионов пространственно совпадают с локальными минимумами в распределении электронной концентрации в верхних слоях ионосферы, а также с повышением температуры электронов [3, 4]. Из этого следует, что ПД может влиять на распространение высокочастотных радиоволн и работу систем спутниковой навигации, что обуславливает практическую важность исследования параметров ПД.

На сегодняшний день существует множество исследований ПД с использованием как данных наземных измерений: радаров некогерентного рассеяния (например, [5, 6]) и ионозондов (на-

пример, [7–10]), так и спутниковых данных (например [3, 11–14]), а также с использованием численного моделирования [10, 15, 16]. Благодаря исследованиям стали известны многие параметры ПД, такие как, пространственное положение ПД, его размеры, вероятность появления, зависимость от геомагнитной активности, крупномасштабные особенности формирования и развития ПД и др. Однако, поскольку ранее научная аппаратура на борту спутников обладала частотой опроса максимум в несколько Гц и не позволяла проводить измерения с высоким временным разрешением, мелкомасштабные процессы внутри ПД практически не анализировались. Кроме того, интересно провести исследования по сопоставлению данных на разных космических аппаратах, регистрирующие ПД во время одной и той же геомагнитной бури/суббури. Для сравнения динамики развития и пространственной структуры ПД по данным различных низкоорбитальных спутников, в настоящей работе использовались наблюдения *NorSat-1* и *Swarm*.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе рассмотрено четыре совместных пролета спутников *NorSat-1* и *Swarm C* (в 10, 13, 16 и 18 ч) во время геомагнитной бури



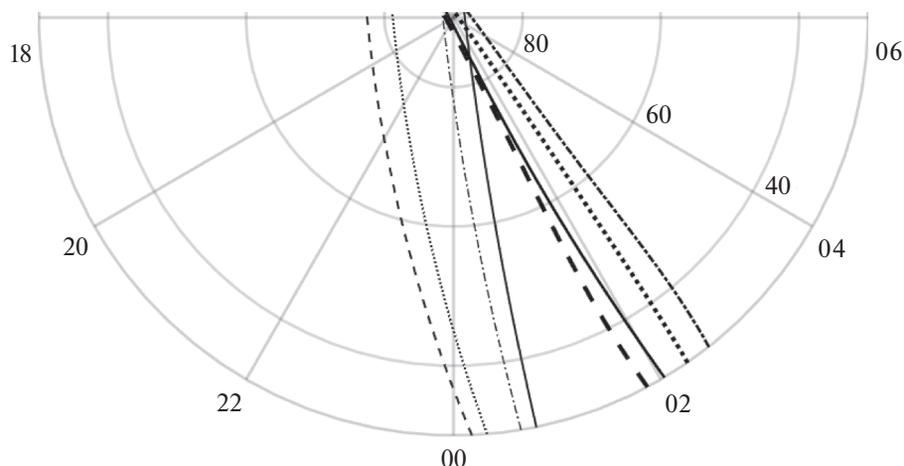
**Рис. 1.** Геомагнитные индексы *SME* (сплошная линия) и *Dst* (пунктир) 19–21.IV.2018. Моменты времени, в которые обнаружен поляризационный джет в каждый из рассмотренных пролетов спутника *Swarm* (*NorSat-1*), обозначены галочками (кружками).

20.IV.2018. На рис. 1 представлены графики геомагнитных индексов *SME* [17] и *Dst* [18], характеризующие геомагнитную обстановку во время данной бури. По данному рисунку можно увидеть, что фаза восстановления бури 20.IV.2018, согласно графику *Dst*, началась в ~09 UT. Поскольку по техническим причинам на спутнике *NorSat-1* не имеется данных с ~00 UT по ~09 UT, за все время бури 20.IV.2018 ПД был обнаружен в первый раз во время пролета спутников в ~10 UT. Таким образом, этот и все остальные случаи обнаружения поляризационного джета, рассмотренные в статье, произошли во время стадии восстановления геомагнитной бури.

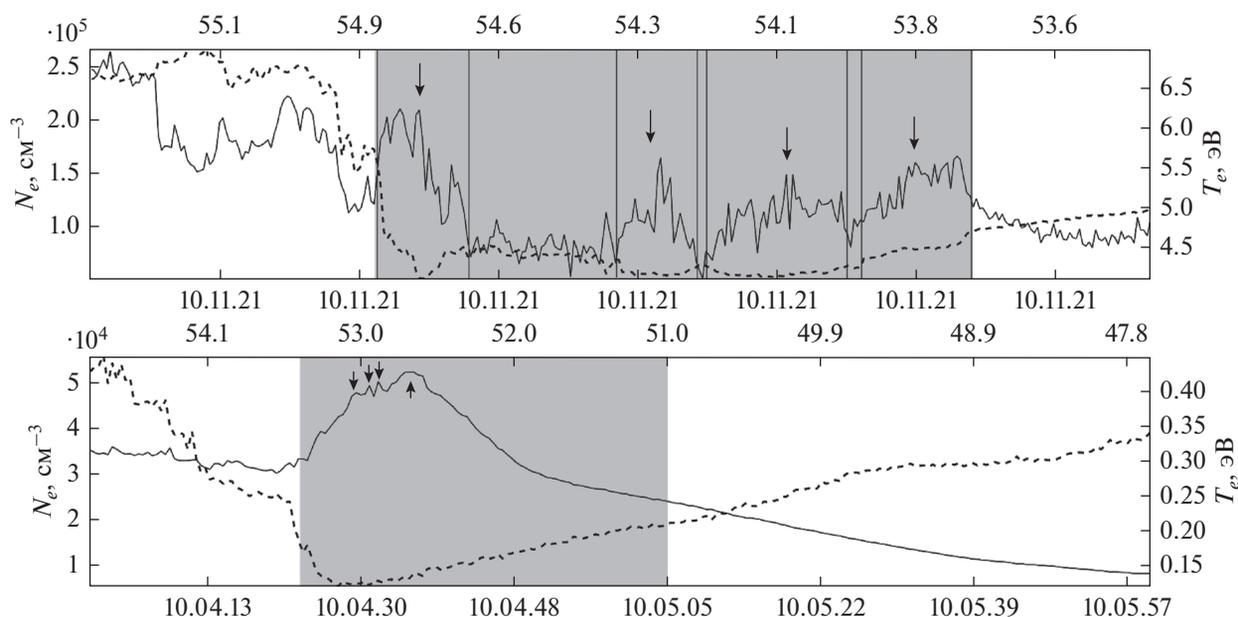
Микроспутник *NorSat-1* проводил измерения параметров ионосферной плазмы системой цилиндрических зондов Ленгмюра с максимальной частотой опроса до 1 кГц [19], что позволяет изучать мелкомасштабную структуру ПД. Также, произведено сравнение эволюции ПД с данными спутника *Swarm C*, который проводил измерения параметров ионосферной плазмы сферическим зондом Ленгмюра с частотой 2 Гц [20]. В рассмотренные в представленной работе моменты времени оба спутника, находясь на солнечно-синхронной орбите, пролетали достаточно близко друг от друга по времени (9–26 мин) и MLT (01–02 ч MLT) на высотах ~460 км (*Swarm C*) и ~600 км (*NorSat-1*), что позволяет провести детальный анализ измерений ПД по данным обоих спутников. Изображение траекторий пролетов обоих спутников во время рассматриваемой бури 20.IV.2018 представлены на рис. 2.

На рис. 3 представлено сравнение изменений концентрации и температуры электронов по наблюдениям спутников *NorSat-1* (верхняя панель) и *Swarm C* (нижняя панель) во время первого рассмотренного совместного пролета. Формулы расчета параметров плазмы по измерениям системой цилиндрических зондов Ленгмюра на спутнике *NorSat-1* приведены в работах [19, 21]. Оба спутника в момент этого пролета находились в северном полушарии и летели от полюса к экватору в секторах ~01 MLT и ~02 MLT для *NorSat-1* и *Swarm C* соответственно, а по времени UT пролет *NorSat-1* в показанной области отстает от пролета *Swarm C* на ~6 мин. Поскольку измерения на спутнике *NorSat-1* проводились с номинальной частотой опроса около 1 кГц, на верхних панелях всех представленных далее рисунков приведены значения, усредненные по 100 точкам, т.е. при обработке данных применена процедура скользящего среднего.

На сегодняшний день известно, что ПД располагается внутри главного ионосферного провала (ГИП), часто у его полярной стенки на границе диффузной зоны вторжения (ГДВ) мягких электронов (Soft Electron Boundary, SEB) [4]. По данным *NorSat-1* на рис. 3 видно, что на ~54.9° инвариантной широты (Invariant Latitude, ILat) в 10.11.25 UT происходит падение электронной концентрации в ~2 раза. По данным *Swarm C* на рис. 3 также заметно падение электронной концентрации в ~1.5 раза на ~53.4° ILat в 10.04.23 UT и затем постепенное восстановление до прежних значений после ~53° ILat в 10.04.30 UT.



**Рис. 2.** Траектории четырех рассмотренных совместных пролетов спутников *NorSat-1* (тонкие линии) и *Swarm C* (жирные линии) в полярных координатах. По угловой оси отложено MLT, по радиальной оси — инвариантные широты. Первые совместные пролеты отмечены сплошной линией, вторые — штрихпунктирной линией, третьи — пунктиром, четвертые — штриховой линией.



**Рис. 3.** Изменение температуры (сплошная линия) и концентрации электронов (пунктирная линия) во время пролета спутника *NorSat-1* в 10.11.18–10.11.51 UT (верхняя панель) и спутника *Swarm C* (нижняя панель) в 10.03.48–10.04.58 UT. По верхней горизонтальной оси отложена проекция геомагнитной широты вдоль магнитных силовых линий дипольной модели магнитного поля Земли на высоту 110 км. Серой областью отмечено расположение ПД. Стрелками и вертикальными линиями указаны провалы электронной концентрации внутри ПД.

С учетом вышесказанного и того факта, что оба спутника в этот момент перемещались из северного полушария в сторону южного, пересекая субавроральную область ионосферы ( $50^{\circ}$ – $70^{\circ}$  ILat), можно утверждать, что оба спутника в отрезке времени, показанном на рис. 3, пересекли SEB и ГИП. По *NorSat-1* на рис. 3 внутри ГИП видно, что на отрезке  $54.9^{\circ}$ – $53.7^{\circ}$  ILat и 10.11.25–10.11.44 UT, прилегающем к полярной стенке ГИП, провал

электронной концентрации совпадает с подъемом электронной температуры. По наблюдениям *Swarm C* на рис. 3 виден аналогичный эффект: отрезок  $53.4^{\circ}$ – $51^{\circ}$  ILat и 10.04.23–10.05.05 UT прилегает к полярной стенке ГИП и внутри него провал электронной концентрации и локальный подъем электронной температуры совпадают. Таким образом, можно сделать вывод, о том, что спутники *NorSat-1* и *Swarm C* во время первого

рассмотренного совместного пролета пересекали поляризационный джет, размер которого составил  $1.2^\circ$  широты по данным *NorSat-1* и  $2.4^\circ$  широты по данным *Swarm C*. Однако, размер ПД, судя по измерениям *Swarm C* в 2 раза больше, чем по *NorSat-1*, и больше, чем типичный размер ПД ( $1^\circ$ – $2^\circ$  широты [4]), позволяет предположить, что отрезок  $53.4^\circ$ – $51^\circ$  ILat по данным спутника *Swarm C* на рис. 3 представляет собой не ПД, а так называемый “субавроральный поляризационный поток” (SAPS) [5]. Термин SAPS описывает более широкую область субавроральных широт, включающую в себя как узкие струи ПД, так и более широкие потоки ионных дрейфов [21], подразумевая, что они имеют один и тот же механизм формирования. Для определения того, чем именно является отрезок  $53.4^\circ$ – $51^\circ$  ILat по данным спутника *Swarm C* на рис. 3: ПД или SAPS, необходимо иметь измерения скоростей дрейфа ионов, которыми мы в данном случае не обладаем.

Как явствует из результатов измерений *NorSat-1*, на рис. 3 внутри ПД за счет высокой частоты опроса спутника видны мелкомасштабные флуктуации электронной температуры, а также четыре локальных провала концентрации (на рис. 3 отмечены стрелками и вертикальными линиями), совпадающих с подъемом температуры, размером в  $0.21^\circ$  широты, наиболее выраженный из которых расположен у полярной стенки ПД на  $54.83^\circ$ – $54.66^\circ$  ILat. Этот результат позволяет предположить, что внутри ПД неоднороден и, возможно, состоит из мелкомасштабных страт. Проверка данной гипотезы требует дальнейших исследований мелкомасштабной структуры ПД.

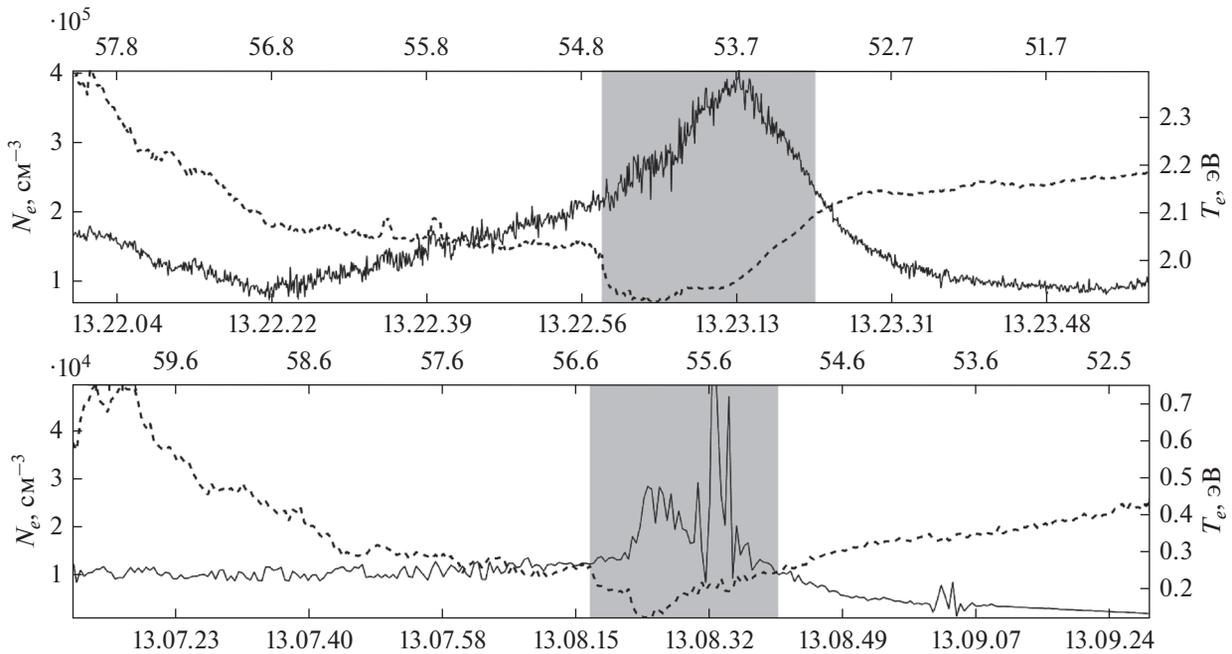
Кроме того, по данным *Swarm C* на рис. 3 видно, что внутри ПД/SAPS на  $\sim 52.9^\circ$  ILat в 10.04.32 UT присутствуют два небольших пика температуры размерами  $\sim 0.1^\circ$  широты, а также небольшой подъем температуры размером  $\sim 0.2^\circ$  широты на  $\sim 52.7^\circ$  ILat в 10.04.35 UT. Данные пики и подъемы температуры внутри ПД/SAPS, измеренные спутником *Swarm C* с частотой опроса 2 Гц, схожи по размерам и местоположению с провалами концентрации внутри ПД, измеренными спутником *NorSat-1* с частотой опроса 1 кГц. Следовательно, можно предположить, что эти два эффекта могут являться одним и тем же явлением, измеренным с разной частотой опроса. Тот факт, что поведение температуры и концентрации электронов по данным спутника *NorSat-1* хорошо соответствует поведению этих параметров по наблюдениям *Swarm C*, говорит о том, что измерения на обоих спутниках являются в достаточной мере корректными и обнаруженные неоднородности не являются локальными, а наоборот, вытянуты вдоль широты на большие расстояния, как и сам ПД. Также по рис. 3 видно, что положение ПД во время пролета спутника *NorSat-1* ( $\sim 54.9^\circ$  ILat) при практически равном уровне геомагнитной активности ( $SME =$

$\sim 1400$  нТл), согласно рис. 1, отличается от положения ПД во время пролета спутника *Swarm C* ( $\sim 53.4^\circ$  ILat) на  $\sim 1.5^\circ$  широты. Этот факт объясняется тем, что, согласно [6], с увеличением MLT в сторону утреннего сектора, средняя ILat ПД/SAPS уменьшается.

На рис. 4 приведено сравнение изменений концентрации и температуры электронов по данным спутников *NorSat-1* (верхняя панель) и *Swarm C* (нижняя панель) во время второго рассмотренного совместного пролета. В момент регистрации ПД спутники пролетали северное полушарие, с разницей по времени UT в  $\sim 15$  мин и по MLT в  $\sim 01$  ч. ПД во время данного совместного пролета лежит в пределах  $54.7^\circ$ – $53.2^\circ$  ILat и 13.22.56–13.23.21 UT по данным спутника *NorSat-1* и в пределах  $56.5^\circ$ – $55.1^\circ$  ILat и 13.08.16–13.08.40 UT по данным спутника *Swarm C*. Размер ПД по широте составляет  $\sim 1.5^\circ$  и  $\sim 1.4^\circ$  для спутников *NorSat-1* и *Swarm C* соответственно. Внутри ПД на рис. 4 видно, что провал электронной концентрации по данным *NorSat-1* на  $\sim 54.7^\circ$ , совпадающий с подъемом электронной температуры, и его дальнейший плавный рост соответствует аналогичному провалу по измерениям *Swarm C* на  $\sim 56.2^\circ$ , который также совпадает с подъемом температуры и в сторону экватора, от которого концентрация электронов плавно растет. Кроме того, большой подъем температуры  $\sim 0.8^\circ$  экваториальнее провала концентрации присутствует и на верхней и на нижней панели рис. 4. Таким образом, поведение электронной концентрации и температуры внутри ПД, а также его размер, в момент данного пролета по данным спутника *NorSat-1* хорошо соответствует поведению электронной концентрации и температуры и размеру ПД, полученные с использованием аппаратуры *Swarm C*.

Также, на рис. 4 показано, что по данным спутника *Swarm C* ПД расположен на  $\sim 2^\circ$  полярнее, чем по наблюдениям *NorSat-1*. Это можно объяснить тем, что, согласно рис. 1, ПД на спутнике *Swarm C* во время второго рассмотренного совместного пролета был обнаружен в момент низкой геомагнитной активности ( $SME = \sim 200$  нТл), а на спутнике *NorSat-1* – во время подъема геомагнитной активности ( $SME = \sim 600$  нТл). С момента обнаружения ПД на спутнике *Swarm C* граница магнитосферной конвекции сдвинулась в сторону экватора к моменту обнаружения ПД на спутнике *NorSat-1*. Таким образом, несмотря на то, что траектория спутника *Swarm C* лежит на  $\sim 2$  ч MLT ближе к утреннему сектору, ПД, обнаруженный по данным спутника *Swarm C*, находится полярнее, чем ПД, обнаруженный по данным спутника *NorSat-1*.

Сравнение изменений температуры и концентрации электронов во время третьего совместного пролета спутников *NorSat-1* и *Swarm C* пред-



**Рис. 4.** Изменение температуры и концентрации электронов во время пролета спутника *NorSat-1* в 13.22.03–13.23.58 UT 20.IV.2018 (верхняя панель) и спутника *Swarm C* (нижняя панель) в 13.07.11–13.09.26 UT. Обозначения такие же, как на рис. 3.

ставлено на рис. 5. В момент обнаружения ПД спутники находились в северном полушарии, с разницей по времени UT в ~22 мин и по MLT в ~2 ч. ПД наблюдается на 50.3°–48.4° ILat и в 16.36.46–16.37.18 UT по данным спутника *NorSat-1* и на 53.7°–52° ILat и в 16.14.20–16.14.47 UT по данным спутника *Swarm C*. Поэтому размеры ПД во время пролета *NorSat-1* составляют ~1.9° широты, а во время пролета *Swarm C* – ~1.7° широты.

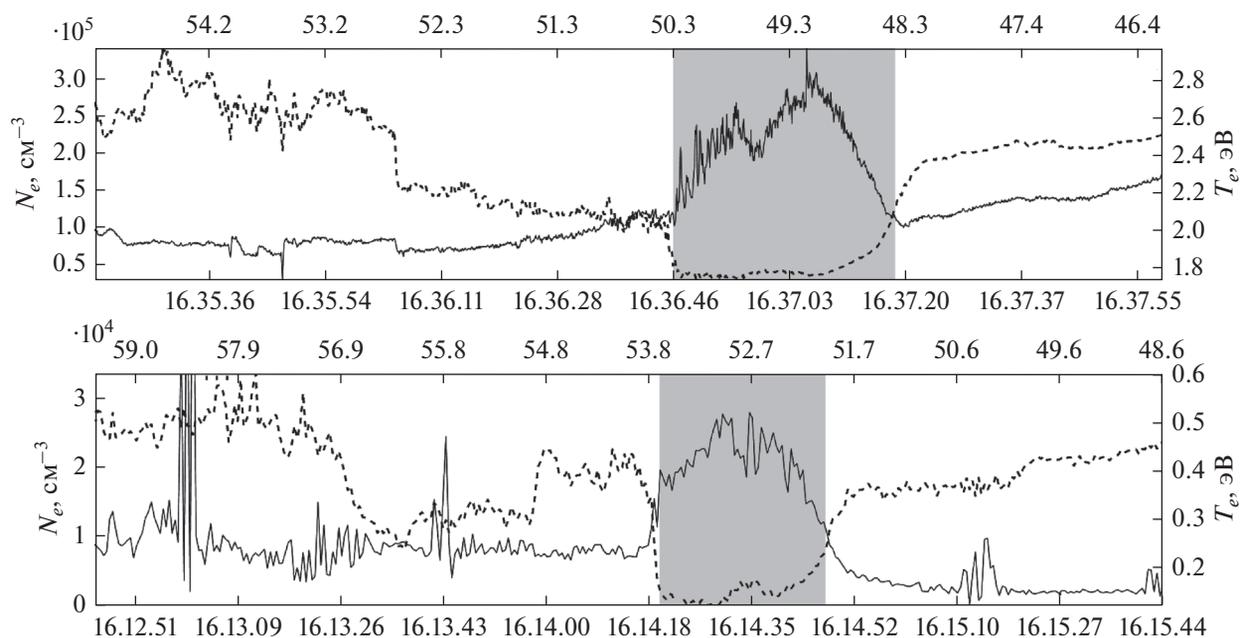
Необходимо отметить, что согласно рис. 5, во время третьего рассмотренного совместного пролета наблюдается наиболее похожее поведение электронной концентрации и температуры внутри ПД по данным обоих спутников среди всех рассмотренных пролетов. Также, по данным *NorSat-1* на рис. 5 наблюдается два подъема электронной температуры и соответствующие им провалы электронной концентрации внутри ПД на ~53.4° и ~52.5° ILat, совпадающие с аналогичными подъемами температуры и провалами концентрации на ~49.8° и ~49.2° по данным *Swarm C*. Это говорит о том, что двойная структура ПД по данным спутника *NorSat-1*, представленная в работе [23], наблюдается также и по данным спутника *Swarm C*. Как было упомянуто выше, это говорит о том, что неоднородности внутри ПД являются не локальными, а вытянуты вдоль широты.

Расположение ПД, зарегистрированного на *Swarm C*, на ~3° широты полярнее ПД, зарегистрированного на *NorSat-1*, во время третьего

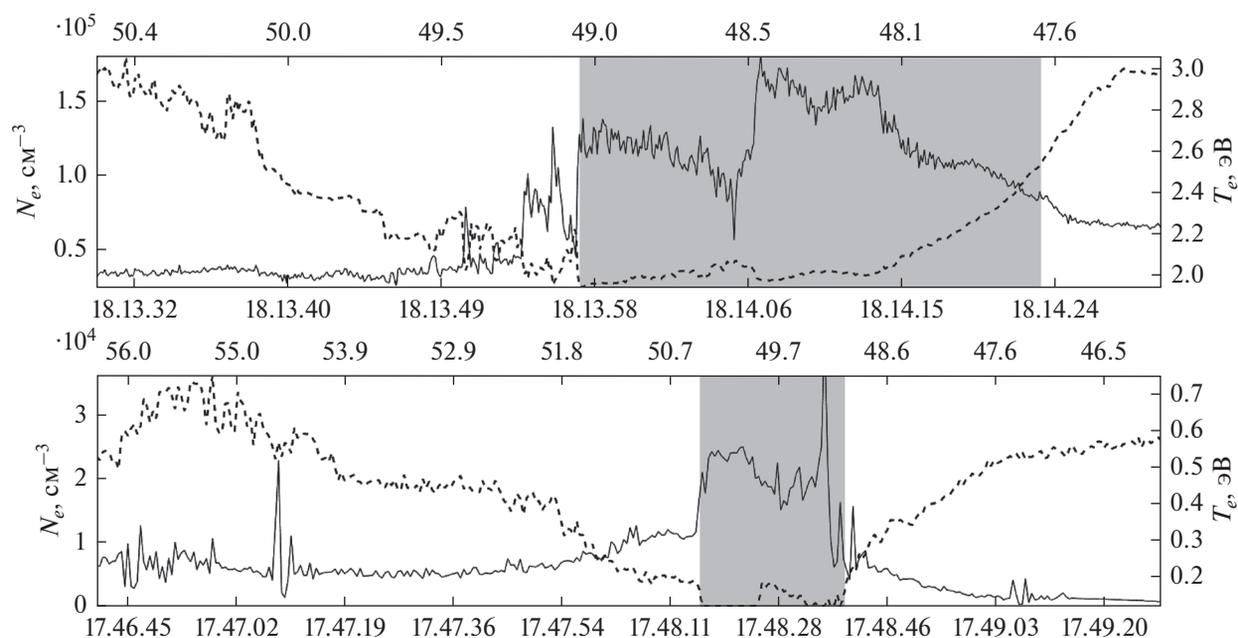
пролета объясняется тем же явлением, что и во время второго пролета, поскольку, согласно рис. 1, ПД на спутнике *Swarm C* во время третьего пролета был обнаружен в момент более низкой геомагнитной активности (SME = ~500 нТл), а на *NorSat-1* – во время более высокой геомагнитной активности (SME = ~800 нТл).

На рис. 6 представлено сравнение изменений электронной температуры и концентрации во время четвертого совместного пролета спутников *NorSat-1* и *Swarm C*. Разница по времени UT между спутниками во время данного пролета достигала ~26 мин, оба спутника в этот момент находились в северном полушарии в секторах ~00 MLT и ~02 MLT для *NorSat-1* и *Swarm C* соответственно. ПД по данным спутника *NorSat-1* расположен в пределах от ~49.05° до ~47.7° ILat (18.13.57–18.14.20 UT) и на 50.4°–49° ILat и в 17.48.16–17.48.39 UT по данным спутника *Swarm C*. Размер ПД во время пролета *NorSat-1* и *Swarm C* приблизительно одинаков и составляет ~1.4° широты. Экваториальная граница ПД согласно наблюдениям *NorSat-1*, которая во время предыдущих пролетов была менее выраженной, чем полярная, во время данного пролета стала еще более размыта, поэтому ее положение и ширина ПД определены с большой неточностью.

По данным *NorSat-1* на рис. 6 внутри ПД на 49.05°–48.55° (18.13.57–18.14.05 UT) и на 48.5°–47.7° ILat (18.14.06–18.14.20 UT) видно два участка



**Рис. 5.** Изменение температуры и концентрации электронов во время пролета спутника *NorSat-1* в 16.35.18–16.37.57 UT 20.IV.2018 (верхняя панель) и спутника *Swarm C* (нижняя панель) в 16.12.44–16.15.44 UT. Обозначения такие же, как на рис. 3.



**Рис. 6.** Изменение температуры и концентрации электронов во время пролета спутника *NorSat-1* в 18.13.30–18.14.30 UT 20.IV.2018 (верхняя панель) и спутника *Swarm C* (нижняя панель) в 17.46.42–17.49.28 UT. Обозначения такие же, как на рис. 3.

повышенной электронной температуры, совпадающие со слабо выраженными понижениями электронной концентрации. Как было упомянуто выше, подобные участки наблюдаются и на рис. 5. В [23] сделано предположение, что данные участ-

ки представляют собой двойную структуру ПД, которая имеет сходства с DSAID (Double-peak Subauroral Ion Drift). DSAID был впервые описан в работе [24], где использовались данные DMSP, а позже эти результаты были подтверждены в ста-

тье [25] с привлечением не только измерений DMSP, но и Van Allen Probes (RBSP). По данным *Swarm C* на рис. 6 внутри ПД также заметны два участка повышенной температуры, совпадающие с провалами концентрации, на  $50.4^{\circ}$ – $49.9^{\circ}$  ILat (17.48.16–17.48.27 UT) и на  $49.5^{\circ}$ – $49^{\circ}$  ILat (17.48.30–17.48.39 UT). Стоит отметить, что провалы электронной концентрации по данным *Swarm C* заметно более выражены, чем участки понижения электронной концентрации по *NorSat-1*. С учетом вышеизложенного можно утверждать, что ПД, зарегистрированный во время третьего и четвертого рассмотренных совместных пролетов спутников *NorSat-1* и *Swarm C*, имеет двойную структуру, вероятно представляющую собой DSAID.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе проведено сравнение динамики развития ПД с использованием результатов измерений на спутниках *NorSat-1* и *Swarm C* во время геомагнитной бури 20.IV.2018, а также исследование мелкомасштабной пространственной структуры ПД. Результаты наблюдений параметров плазмы внутри ПД получены на космическом аппарате *NorSat-1* с помощью системы зондов Ленгмюра, имеющей номинальную частоту опроса до 1 кГц, позволили провести измерения с высоким временным разрешением, что соответствует пространственному разрешению вплоть до десятков метров. Проведен сравнительный анализ результатов зависимости концентрации и температуры электронов от геомагнитной широты (проекция по дипольной модели магнитного поля Земли на высоту 110 км, ILat) одновременно по данным спутников *NorSat-1* и *Swarm C* во время их пересечения ПД.

Хорошее совпадение поведения таких параметров ионосферной плазмы внутри ПД как температура и концентрация электронов согласно наблюдениям *NorSat-1* и *Swarm C* говорит о том, что система многоигольных зондов Ленгмюра на борту *NorSat-1* и сферический зонд Ленгмюра на спутнике *Swarm C* дают похожие результаты. Несмотря на разницу в высоте орбит в  $\sim 140$  км и в долготе в  $\sim 2$  ч MLT, на графиках плазменных параметров по измерениям на обоих спутниках наблюдаются схожие структуры. Сходство поведения температуры и концентрации электронов на высотах  $\sim 450$  и  $\sim 600$  км можно объяснить тем, что ПД по данным обоих космических аппаратов обнаружен близко (разница  $1^{\circ}$ – $3^{\circ}$ ) по проекции геомагнитной широты по дипольной модели магнитного поля Земли (ILat). Поскольку ПД вызывается электрическими полями, проецированными на ионосферу из магнитосферы вдоль силовых линий магнитного поля Земли [26], в точках ионосферы, расположенных на разных высотах в

пределах области F, но имеющих одинаковую координату ILat, структура ПД остается идентичной. Сходство поведения плазменных параметров внутри ПД на разных долготах (на 00–01 и  $\sim 02$  MLT) объясняется тем, что, согласно [3], в среднем ПД является растянутым по долготе от 18 до 02 ч MLT. Таким образом, предполагается, что ПД, обнаруженный по измерениям *NorSat-1* и по измерениям *Swarm C*, представляет собой одно и то же явление.

Согласно проведенному анализу результатов для первого рассмотренного пролета, при равном уровне геомагнитной активности ( $SME = \sim 1400$  нТл) ПД по *NorSat-1* расположен полярнее, чем по *Swarm C* на  $\sim 1.5^{\circ}$ . Это объясняется тем, что, как показано в [6], инвариантная широта ПД/SAPS уменьшается с увеличением MLT в сторону утреннего сектора. Во время остальных рассмотренных пролетов наблюдается уменьшение ILat ПД с увеличением авроральной геомагнитной активности, что согласуется с результатами работы [27].

В настоящей работе по данным *Swarm C* обнаружено наличие двойной структуры ПД, вероятно представляющей собой так называемый DSAID, обнаруженный ранее на спутнике DMSP [24] и *NorSat-1* [23]. Объяснение механизма возникновения и развития данного явления представлено в работах [24, 25] и [28]. В [24] предполагается, что источником DSAID может являться магнитосферный генератор тока. Большие азимутальные градиенты ионного давления в экваториальной плоскости вызывают относительно большие продольные токи (Field-Aligned Current, FAC). Взаимодействия волна-частица могут создавать многослойные структуры продольных токов. Электрические поля ионосферы регулируются соответствующим образом, чтобы обеспечить ток, необходимый для магнитосферы, когда продольные токи втекают в ионосферу в области низкой проводимости, связанной с ГИП. Если заданных нисходящих продольных токов недостаточно для возврата всего ионосферного тока Педерсена в области низкой проводимости, ток может быть вынужден создать другой канал, что приведет к появлению нескольких коротко замкнутых цепей, каждая из которых генерирует большие субавроральные полярные электрические поля и последующий сильный дрейф ионов на запад. Результаты [25] подтверждают, что DSAID действительно связаны с продольными токами в области 2 (R2 FAC), протекающими в области с низкой проводимостью. Авторы статьи [28] развивают данный подход, связывая случаи появления DSAID с циклом конвекции Данжи, а также показывают, что вышеупомянутые коротко замкнутые цепи иногда действуют как генератор тока, а иногда как генератор напряжения.

Также согласно результатам, полученным в настоящей работе, двойная структура ПД, а также поведение плазменных параметров внутри ПД, в целом, совпадает в секторе 00–01 MLT и в секторе ~02 MLT. На основании этого можно утверждать, что вышеописанные структуры не являются локальными и растянуты по долготе как минимум на ~2 ч MLT. Кроме того, вытянутыми минимум на ~2 ч MLT являются обнаруженные в ходе представленного исследования структуры внутри ПД размером  $0.1^{\circ}$ – $0.2^{\circ}$  широты, которые могут являться более мелкомасштабными стратами ПД. Проверка данного предположения требует дальнейших спутниковых исследований (in situ) мелкомасштабной структуры ПД.

## ВЫВОДЫ

Во время геомагнитной активности по данным спутников *NorSat-1* и *Swarm C* обнаружен ПД и изучена его пространственная структура. Проведен сравнительный анализ зависимости плотности и температуры электронов от проекции геомагнитной широты на высоту 110 км одновременно по измерениям на спутниках *NorSat-1* и *Swarm C* во время их пересечения ПД. В процессе исследования были получены следующие основные результаты:

- Внутри ПД обнаружены мелкомасштабные пространственные структуры размером в  $0.1^{\circ}$ – $0.2^{\circ}$  широты.
- Подтверждена зависимость инвариантной широты ПД от авроральной геомагнитной активности и от MLT.
- Внутри ПД обнаружена двойная пространственная структура, вероятно являющаяся DSAID.
- Пространственные структуры внутри ПД не являются локальными и растянуты по MLT как минимум на 2 ч MLT.

Мы благодарны Мировому центру данных по геомагнетизму в Киото [<http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp>], организациям и национальным агентствам, входящим в SuperMAG [<http://supermag.jhuapl.edu/info>], за предоставление данных по индексам геомагнитной активности, а также Европейскому Космическому Агентству (ESA) за доступ к данным спутниковой миссии *Swarm* [[https://Swarm-diss.esa.int/#Swarm/Advanced/Plasma\\_Data](https://Swarm-diss.esa.int/#Swarm/Advanced/Plasma_Data)], и Университету Осло и лично Лассе Клаусену за доступ к измерениям зондов Ленгмюра на спутнике *NorSat-1* [<http://tid.uio.no/plasma/norsat>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. I. Вопросы методики и некоторые результаты измерений в

магнитно-спокойное время // Космич. исслед. 1973. Т. 11. № 2. С. 273–283.

2. Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. II. Результаты измерений во время магнитной бури 3 ноября 1967 г. // Космич. исслед. 1973. Т. 11. № 2. С. 284–296.
3. Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmosphere Explorer C // Geophys. Res. Lett. 1979. V. 6. Is. 8. P. 657–660. <https://doi.org/10.1029/GL006>
4. Anderson P.C., Heelis R.A., Hans W.B. The Ionospheric Signatures of Rapid Subauroral Ion Drifts // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № A4. P. 5785–5792. <https://doi.org/10.1029/90JA02651>
5. Foster J.C., Burke W.J. SAPS: A new categorization for subauroral electric fields // EOS Trans. AGU. 2002. V. 83. P. 293–294. <https://doi.org/10.1029/2002EO000289>
6. Foster J.C., Vo H.B. Average characteristics and activity dependence of the subauroral polarization stream // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № A12. P. 1475. <https://doi.org/10.1029/2002JA009409>
7. Бондарь Е.Д., Халипов В.Л., Степанов А.Е. Характеристики поляризационного джета по измерениям на субавроральных станциях Якутск и Подкаменная Тунгуска // Солнечно-земная физика. 2005. № 8. С. 143–144.
8. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Бондарь Е.Д. Вариации положения поляризационного джета и границы инжекции энергичных ионов во время суббури // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. Т. 56. № 2. С. 187–193. <https://doi.org/10.7868/S0016794016020085>
9. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017.
10. Степанов А.Е., Гололюбов А.Ю., Халипов В.Л., Голиков И.А. Вариации ионосферных параметров при формировании поляризационного джета. // Геомагнетизм и аэрномия. 2021. Т. 61. № 1. С. 60–65. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010156>
11. Anderson P.C., Carpenter D.L., Tsuruda K. et al. Multi-satellite observations of rapid subauroral ion drifts (SAID) // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № A12. P. 29585–29599. <https://doi.org/10.1029/2001JA000128>
12. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А. и др. Вертикальные скорости дрейфа плазмы при наблюдении поляризационного джета по наземным доплеровским измерениям и данным дрейфометров на спутниках DMSP // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. Т. 56. № 5. С. 568–578. <https://doi.org/10.7868/S0016794016050060>
13. Mishin E.V., Nishimura Yu., Foster J. SAPS/SAID revisited: A causal relation to the substorm current wedge // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 112. Is. 8. P. 8516–8535. <https://doi.org/10.1002/2017JA024263>

14. *Mishin E.V., Puhl-Quinn P.A.* SAID: Plasmaspheric short circuit of substorm injections // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. Is. 24. P. L24101. <https://doi.org/10.1029/2007GL031925>
15. *Galperin Yu.I.* Polarization jet: characteristics and a model // *Ann. Geophys.* 2002. V. 20. № 3. P. 391–404. <https://doi.org/10.5194/angeo-20-391-2002>
16. *de Keyser J.* Storm-Time Energetic Particle Penetration Into the Inner Magnetosphere as the Electromotive Force in the Subauroral Ion Drift Current Circuit // *Washington DC American Geophys. Union. Geophys. Monograph.* 2000. V. 118. P. 261–265. <https://doi.org/10.1029/GM118p0261>
17. *Newell P.T., Gjerloev J.W.* Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. № A12211. <https://doi.org/10.1029/2011JA016779>
18. *Nose M., Iyemori T., Sugiura M., Kamei T.* Geomagnetic Dst index. Kyoto: World Data Center for Geomagnetism, 2015. <https://doi.org/10.17593/14515-74000>
19. *Hoang H., Clausen L.B.N., Røed K. et al.* The Multi-Needle Langmuir Probe System on Board *NorSat-1* // *Space Sci. Rev.* 2018. V. 214. Is. 4. P. 75. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0509-2>
20. *Knudsen D.J., Burchill J.K., Buchert S.C. et al.* Thermal ion imagers and Langmuir probes in the *Swarm* electric field instruments // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2017. V. 122. Is. 2. P. 2655–2673. <https://doi.org/10.1002/2016JA022571>
21. *Chernyshov A.A., Chugunin D.V., Frolov V.L. et al.* In situ observations of ionospheric heating effects: first results from a joint SURA and NorSat-1 experiment // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. Is. 13. <https://doi.org/10.1029/2020GL088462>
22. *Yeh H.C., Foster J.C., Rich F.J., Swider W.* Storm time electric field penetration observed at mid-latitude // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. Is. A4. P. 5707–5721. <https://doi.org/10.1029/90JA02751>
23. *Синевич А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В. и др.* Исследование мелкомасштабной структуры поляризованного джета во время геомагнитной бури 20.IV.2018 // *Солнечно-земная физика.* 2021. Т. 7. № 1. С. 21–33. <https://doi.org/10.12737/szf-71202103>
24. *He F., Zhang X.-X., Wang W., Chen B.* Double-peak subauroral ion drifts (DSAIDs) // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 5554–5562. <https://doi.org/10.1002/2016GL069133>
25. *Wei D., Yu Y., Ridley A.J. et al.* Multi-point observations and modeling of subauroral polarization streams (SAPS) and double-peak subauroral ion drifts (DSAIDs): A case study // *Adv. Space Res.* 2019. V. 63. P. 3522–3535. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.02.004>
26. *Southwood D.J., Wolf R.A.* An assessment of the role of precipitation in magnetospheric convection. // *J. Geophys. Res.* 1978. V. 83. P. 5227–5232.
27. *Karlsson E., Marklund G., Blomberg L., Malkki A.* Subauroral electric fields observed by Freja satellite: A statistical study // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. P. 4327–4341. <https://doi.org/10.1029/97JA00333>
28. *Horvath I., Lovell B. C.* Investigating the development of double-peak subauroral ion drift (DSAID) // *J. Geophys. Res. Space Physics.* 2017. V. 122. P. 4526–4542. <https://doi.org/10.1002/2016JA023506>

УДК 550.338

## ДОЛГОЖИВУЩИЕ МЕТЕОРНЫЕ СЛЕДЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ПРИ РАДИАЛЬНОМ РАСШИРЕНИИ КРУПНЫХ МЕТЕОРОИДОВ

© 2021 г. А. В. Михалев\*

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

*\*mikhalev@iszf.irk.ru*

Поступила в редакцию 21.02.2021 г.

После доработки 18.04.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

В работе рассматривается возможный механизм образования долгоживущих метеорных следов необычной геометрической формы в рамках модели мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической силы и растеканием метеорного вещества в поперечном основном движению ядра направлении, впервые предложенной в 1979 г. С.С. Григоряном и развитой в последующие годы другими авторами. В рассматриваемом событии долгоживущий метеорный след определялся формой метеороида и его динамикой в процессе разрушения метеорного тела. Метеорный след стал формироваться вблизи поверхности тела метеороида при его радиальном расширении, что согласуется с моделью С.С. Григоряна мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической силы и поперечным расширением при разрушении метеорного тела упругими волнами. Метеорный след “уходит” в обратном и радиальном направлениях по отношению траектории полета основного метеороидного тела. Отмечается, что наблюдаемые времена жизни долгоживущих метеорных следов (~20–40 мин) и их пространственные масштабы (десятки-сотни километров) могут обеспечиваться распространением крупных метеорных частиц ( $\geq 100$  мкм). Эти частицы обладают высокими значениями импульса, которые сохраняются при горизонтальном распространении на высотах атмосферы с одинаковой плотностью на больших расстояниях без существенной потери скорости. В этом случае свечение метеорного следа может определяться классическими механизмами собственного свечения метеорного вещества и газовыми составляющими атмосферы.

DOI: 10.31857/S0023420621060066

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно классической физике метеорных явлений излучение метеоров формируется в коме, т.е. нагретой газовой оболочке, состоящей из смеси воздуха и метеорных паров. Обычно сопровождается линейным метеорным следом вдоль траектории метеороида, и далее может трансформироваться под действием преимущественных ветров на высотах высвечивания метеоров. В работе [7] описаны случаи регистрации эллипсоидальных долгоживущих метеорных следов. Изображения необычных метеорных следов иногда появляются и в интернете (см., например, изображение яркого метеора со следом из потока Геминид, зарегистрированного 9.XII.2010 в САО РАН). В качестве основной проблемы при интерпретации таких следов следует отметить механизм образования необычной геометрической структуры долгоживущих метеорных следов.

В настоящей работе рассматривается возможный механизм образования метеорных следов в рамках модели мгновенного разрушения метеор-

ного тела под действием аэродинамической силы и поперечным расширением, впервые предложенной в 1979 г. С.С. Григоряном [5] и развитой в последующие годы другими авторами.

### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

**Отдельные наблюдательные данные долгоживущих метеорных следов.** В работе [7] описываются 4 события долгоживущих метеорных следов (ДМС), два из которых имели редкие квазисимметричные эллипсоидально-кольцевые формы.

**Событие 18.XI.2017.** Событие регистрировалось двумя камерами в 2-х обсерваториях (Саянской солнечной обсерватории и Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН), разнесенных на расстояние ~150 км, что позволило выполнить базисные определение высоты следа. Метеорный след распространяется преимущественно горизонтально в интервале высот 86–91 км. Полное время наблюдения метеорного следа по оптическим данным составило ~35–40 мин. Носовая

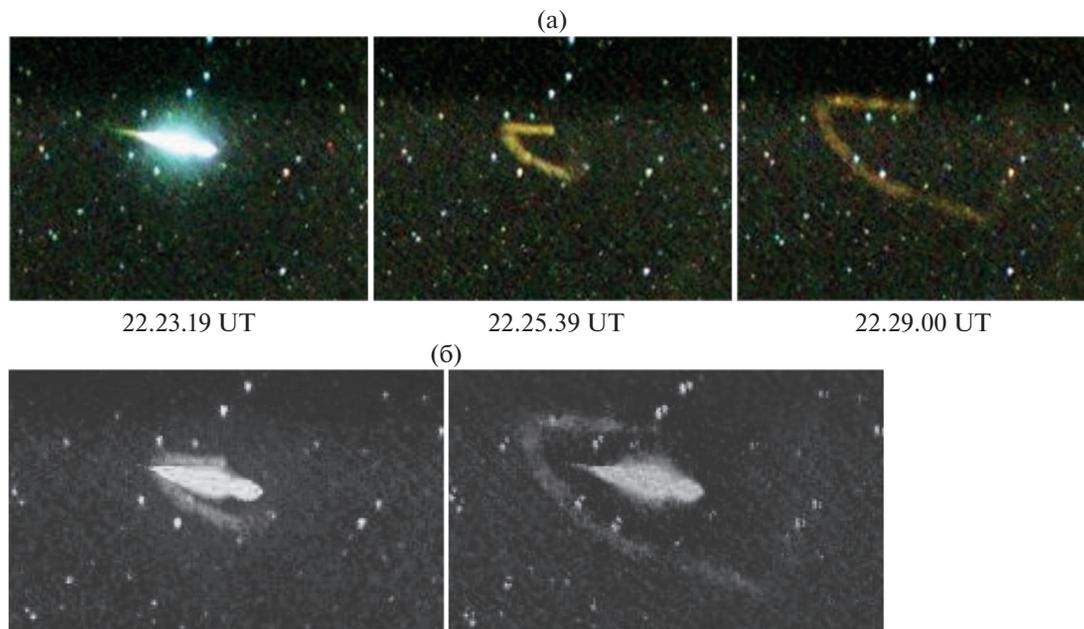


Рис. 1. (а) Время экспозиции кадров 60 с. (б) Комбинированные изображения, слева кадр 1 и 2, справа – кадры 1 и 3.

часть петли метеорного следа двигалась с постоянной скоростью по разным оценкам от  $\sim 80$  до  $\sim 320$  м/с [4, 10] и за указанное время сместилась на расстояние  $\sim 400$  км. В Саянской солнечной обсерватории этот след наблюдался в околосенитной области небосвода. Ориентация трека и момент обнаружения позволили сделать вывод о его принадлежности к метеорному потоку Леониды, средняя скорость движения частиц которого в атмосфере Земли составляет около 70 км/с. Оценка блеска метеора дала значение абсолютной звездной величины около  $-7.3^m$  [4].

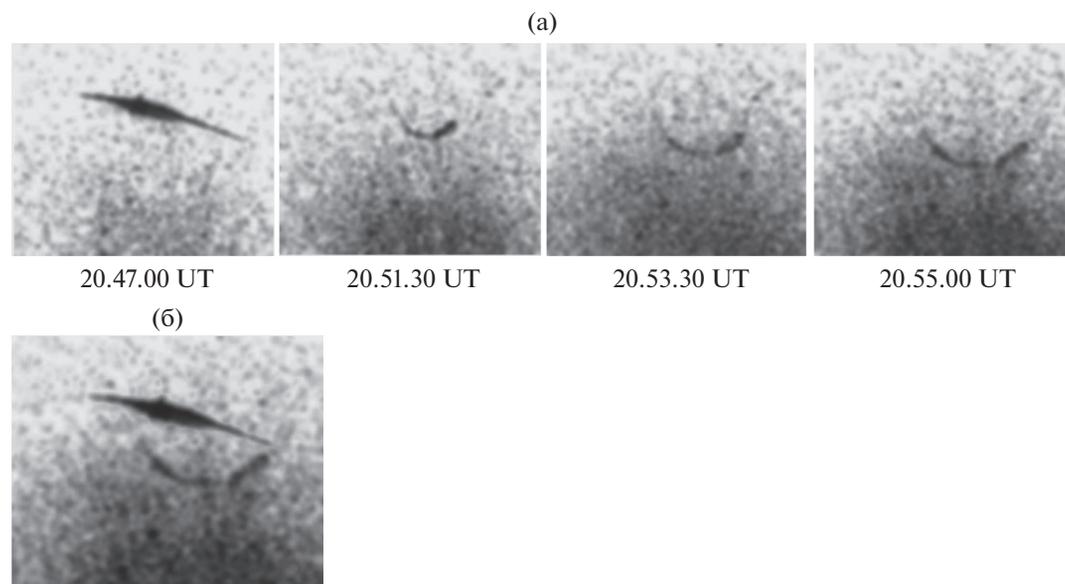
**События 23.I.2018.** Этот ДМС был зарегистрирован в Геофизической обсерватории черно-белой камерой всего неба в эмиссии 557.7 нм у восточного горизонта. Время наблюдения этого метеорного следа составило  $\sim 20$  мин. Проекция скорости перемещения метеорного следа на направление наблюдения составила  $\sim 34\text{--}40$  м/с (для высоты 90 км). К сожалению, вхождение этого метеороида в атмосферу Земли не попало в поле зрения камеры, установленной в Саянской солнечной обсерватории. Поэтому базисные наблюдения не были осуществлены, что не позволило оценить реальное направление и скорости для этого события.

На рис. 1а показаны примеры последовательных изображений, полученных 18.XI.2017 в Саянской солнечной обсерватории цветной камерой всего неба [7]. На рис. 1а показаны оригинальные изображения, а рис. 1б – комбинированные изображения, полученные наложением оригинальных изображений.

На рис. 2а показаны примеры последовательных изображений, полученных 23.I.2018 в Геофизической обсерватории черно-белой камерой всего неба в эмиссии 557.7 нм [7]. На рис. 2а показаны оригинальные изображения, а на рис. 2б – комбинированное изображение, полученное наложением оригинальных изображений.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Установлено, что ДМС в атмосфере Земли возникают в основном во время полетов крупных метеороидов или болидов сильных метеорных потоков, таких как Леониды [1, 11], и сопровождаются нетипичными для обычных метеоров рядом геофизических явлений. В настоящее время в основном рассматриваются два вида метеорных следов – пылевые и газовые (или ионизационные). Пылевые следы образуются только яркими болидами в результате конденсации паров метеорного вещества в голове и следе болида. Ионизированные метеорные следы являются результатом образования излучающей метеорной плазмы [1, 3, 8]. Соответственно можно говорить о двух механизмах поддержания метеорного следа в течение длительного времени. Это рассеяние солнечного света, в основном на мельчайших пылинках в случае пылевых метеорных следов, и свечение вследствие ионизационных и рекомбинационных процессов в метеорной плазме и нейтральной атмосфере, в случае ионизационных следов [3, 6].



**Рис. 2.** (а) Время экспозиции кадров 60 с. (б) Комбинированное изображение для кадров 20.47.00 и 20.55.00 UT.

Важно, что согласно концепции метеорного явления, тормозящиеся частицы метеорной плазмы отстают от метеорного тела, образуя его кому и хвост и сохраняя направление движения основного метеорного тела [9].

Формы ДМС, образующиеся в процессе их динамики достаточно разнообразны и могут быть представлены петлями, спиралями, сферическими сгустками [1, 12]. Принципиально важно, что в подавляющем большинстве случаев регистрируемые формы ДМС формируются из линейных следов в процессе их последующей эволюции под действием преимущественных ветров на высотах высвечивания метеоров [2, 13] и других возможных источников. В работе [12] описывается оптически тонкий инверсионный след, который на конечной стадии эволюционирования приобрел квазиколецевую форму. По мнению авторов, его кольцевая форма вызвана гравитационными волнами, образующимися ветрами над высокогорными массивами. Вероятно, важно и то обстоятельство, что пространственно-временные и высотные характеристики ветровых потоков на высотах турбопаузы и ниже ( $\leq 100$  км) достаточно сильно изменчивы, что исключает сохранение строго геометрических форм ДМС в процессе их эволюции.

Основная особенность представленных на рис. 1–2 ДМС заключается в том, что их формы формируются и распространяются в направлении отличном от основной траектории полетов метеороидов, образуя и сохраняя при этом правильные геометрические фигуры. Для события 18.XI.2017 это полуэллипс, а для события 23.I.2018 – полукруг. При этом начальная форма указанных ДМС

сформировалась в самые начальные моменты их регистрации, что, вероятно, делает невозможным влияние ветровых атмосферных потоков на начальную форму ДМС.

Для события 18.XI.2017 на снимке виден яркий трек, блеск и размеры которого равномерно возрастают по ходу движения метеорного тела и резко обрывается в конце, что соответствует картине абляционного горения метеороида в разреженных слоях атмосферы [4]. При этом образующийся ДМС от этого метеороида распространяется поперек траектории полета и в обратном направлении полета основного тела. Комбинированные снимки, представленные на рис. 1б, могут указывать на то, что ДМС в этом событии определялся формой метеороида и ее динамикой, формируясь на его поверхности (рис. 1б, левый снимок). В дальнейшем метеорный след распространялся с относительно постоянной скоростью, примерно сохраняя первоначально сформированную геометрию следа (рис. 1б, правый снимок).

Для события 23.I.2018 образуется полукруговой ДМС (для момента времени 20.53.30 UT ближе к круговому). Так как этот метеорный след наблюдался у восточного горизонта, то ориентацию траектории полета метеороида и метеорного следа в пространстве определить не представлялось возможным.

В связи отмеченной особенностью анализируемых ДМС большой интерес представляет работа [5], в которой рассматривался нетрадиционный механизм разрушения метеороидов в атмосферах планет. В результате детальных расчетов автор этой работы пришел к выводу, что для некоторых крупных метеороидов (болидов) может реализо-

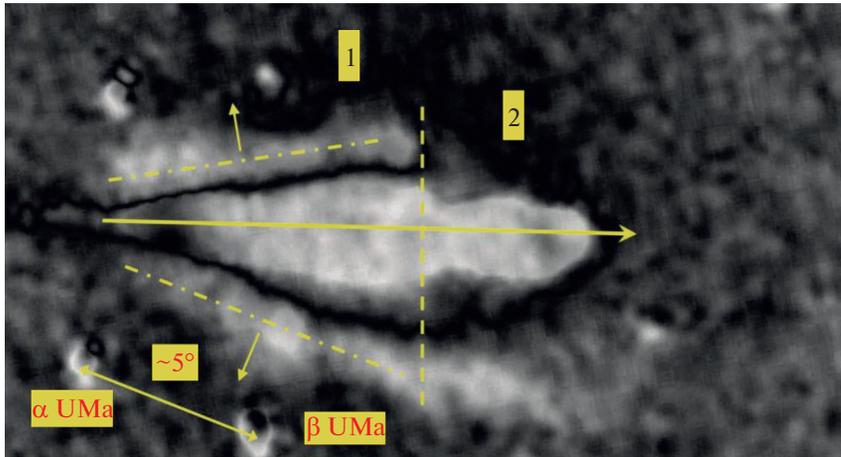


Рис. 3. Комбинированное изображение для события 18.XI.2017 в моменты регистрации 22.23.29 и 22.25.39 UT.

ваться сценарий с существенным ростом поперечных размеров и уменьшением толщины метеороида за счет дробления метеорита до мельчайших частиц и превращения его в “жидкость” с последующим растеканием в боковом направлении набегающим потоком.

На рис. 3 для возможной интерпретации метеорного следа в рамках результатов и выводов работы [5] приведен увеличенный фрагмент рис. 16 (левое изображение) с нанесением поясняющих линий и дополнительной информации, относящихся к различным объектам — метеору и метеорному следу, и положению отдельных звезд. Сплошной горизонтальной линией со стрелкой отмечен метеор. Стрелка показывает направление движения метеора. Штрих-пунктирными линиями показан метеорный след. Стрелки у этих линий показывают направление распространения метеорного следа. Вертикальные штриховые линии разделяют динамику метеора и метеорного следа на 2 условные фазы динамики метеора и метеорного следа. В нижнем левом углу рисунка для оценок угловых размеров явления отмечены положения и угловое расстояние между двумя звездами  $\alpha$  UMa и  $\beta$  UMa из созвездия Большой Медведицы.

Согласно [4] видимая длина трека метеора (болида) в событии 18.XI.2017 оценивается величиной  $\sim 45$  км. Оценка величины видимой длины трека метеора, полученная из размера трека метеора и углового расстояния между звездами  $\alpha$  UMa и  $\beta$  UMa на рис. 3, для высоты  $\sim 100$  км имеет вдвое меньшее значение  $\sim 26$  км. При скорости метеороида  $\sim 40$ – $70$  км/с он проходит расстояние  $\sim 26$  км за время порядка  $\sim 0.65$ – $1.75$  с. При времени экспозиции кадра 60 с изображение метеора, вероятно, можно интерпретировать некоторой временной разверткой, отражающей изменение поперечных размеров метеороида (учи-

тывая внешнюю резкую границу изображения), возможно включая окружающую кому.

В этом предположении можно отметить наиболее интересные особенности рис. 3. Пространственное положение метеорных следов (наклон относительно траектории полета метеора) и его мелкомасштабные неоднородности, зарегистрированные через  $\sim 140$  с после пролета метеора в фиксированной пространственной области, совпадают с поверхностью или особенностями изображения метеора.

Особенно отчетливо это проявляется на начальной фазе линейного увеличения поперечного размера изображения метеора, отмеченной на рис. 3 цифрой “1”. В финальной стадии динамики изображения метеора, отмеченной на рис. 3 цифрой “2”, поведение метеорного следа является более сложным — исчезновение его в верхней части рисунка и присутствие в нижней части рисунка. Вероятно, в финальной части движения метеороида разрушение его тела осуществляется как классическим механизмом за счет плавления и испарения, так и чисто механическим уносом метеорного вещества [5].

Согласно [5] в достаточно крупных метеороидах в процессе их полета в атмосфере Земли кроме процессов плавления и испарения иногда может реализовываться и механизм “мгновенного” дробления метеороида до мельчайших частиц, и превращения его в “квазизидкое” состояние. Дробление метеороида начинает осуществляться, когда давление набегающего потока газа на лобовой поверхности становится выше прочности материала метеорита. В этом случае по метеороиду начинает распространяться волна давления со скоростью, имеющей порядок скорости упругих волн в материале болида порядка нескольких км/с. Можно предположить, что процесс дробления метеороида идет по сценарию эффекта падающего доми-

но. Сначала дробится поверхностный слой, затем критическое давление переносится на следующие слои, которые также дробятся и т.д. При скорости волны давления по метеороиду  $\geq 1$  км/сек и размере метеороида  $\sim 10$  см время “мгновенного” взрывного дробления метеороида может быть  $\leq 10^{-4}$  с. При этом собственно взрыва в классическом понимании применительно к метеорам может и не быть. При этом “дробленое вещество болида будет растекаться в стороны и назад”.

Совместный анализ динамики поперечных размеров метеороида (болида) и положение метеорного следа, представленных на рис. 3, вероятно, позволяет предположить, что изложенная выше концепция С.С. Григоряна [5] может быть использована для интерпретации механизма образования квазикруговых или квазиэллиптических долгоживущих метеорных следов, описанных в работе [7]. В этом случае, вероятно, анализируемые в настоящей работе ДМС могут служить первым экспериментальным подтверждением теоретической модели Григоряна [5].

Что касается времени жизни наблюдаемых метеорных следов ( $\sim 20$ – $40$  мин) можно отметить следующее. В работе [7] было показано, что крупные метеорные частицы ( $\geq 100$  мкм) при горизонтальном распространении на высотах  $\sim 70$ – $120$  км могут распространяться без потери скорости на расстоянии десятки-сотни километров. В анализируемом случае в рамках концепции “мгновенного” разрушения и радиального растекания крупных метеороидов [5] это могут частицы мелкодисперсной фазы метеорного вещества, образованные в результате дробления основного метеороидного тела и его “сдувания” набегающим воздушным потоком.

Следует отметить некоторые особенности цветовых характеристик регистрируемого ДМС, указывающих на возможный химический состав метеороида и механизм свечения ДМС. Пылевые долгоживущие метеорные следы, образованные в результате рассеяния сумеречного света, обычно имеют дымчато-белесый цвет (см., например, [1]). Анализируемый метеорный след, зарегистрированный цветной камерой в R-G-B каналах, на протяжении всего времени наблюдения имеет желтоватый оттенок (см. рис. 1). И регистрируется в основном только в зеленом G и красном R цветовых каналах [4, 7]. Это, вероятно, позволяет исключить механизм свечения ДМС в результате рассеяния света источниками со сплошным спектральным составом, включая сумеречное солнечное излучение. Согласно [Смирнов, 1994] в красной и желтой части метеорного спектра чаще всего излучают линии железа, азота, кремния (например, линии FeI – 629.8, 630.15, 642.1, 654.6 нм и др., N<sub>2</sub> – 630.5, 644.8, 654.5 нм и др., SiII – 637.1 нм) и дуплет натрия (NaI – 589.0 и

589.6 нм). Это может указывать, что анализируемый ДМС мог высвечивать по классическому механизму за счет ионизации и возбуждения атомов и ионов при взаимных столкновениях, при комбинации свободных электронов с ионами и последующих каскадных переходов в нагретой плазменно-газовой оболочке, состоящей из смеси воздуха и метеорного вещества. Следует отметить, что в метеорных следах обнаруживаются линии и молекулярные полосы атмосферных составляющих, присущие собственному свечению верхней атмосферы, в частности, запрещенным линиям атомарного кислорода OI 557.7 и 630.0 нм, полос гидроксила OH в красной области спектра и других [3, 8, 11].

Отличие анализируемого цвета ДМС от традиционных метеорных спектров, в которых обычно изменяется спектр метеора за время полета в результате прохождения различных высот с резко меняющимися плотностью и составом [8], заключается в том, что желтоватый цвет метеорного следа сохранялся на протяжении всего времени его регистрации. Эта особенность может быть обусловлена необычной траекторией горизонтального полета мелкодисперсной фазы метеорного вещества в атмосфере Земли с сохраняющимися плотностью и составом. А существенно меньшая скорость распространения ДМС по сравнению со скоростью основного метеороидного тела позволяет предложить, что для мелкодисперсной фазы, представляющей метеорный след, сохраняются условия медленной абляции метеорного вещества ДМС. В этом случае анализируемый метеорный след условно можно назвать “тлеющий метеорный след” по аналогии с тлеющим газовым разрядом. Последнее предположение, безусловно, является предварительным и требует дополнительных исследований.

## ВЫВОДЫ

Впервые рассмотрено экспериментальное подтверждение концепции “мгновенного” разрушения и радиального растекания крупных метеороидов [5], связанное с образованием ДМС, распространяющихся в радиальных и возвратных направлениях по отношению траектории основного тела метеороида.

В рассматриваемом событии 18.XI.2017 долгоживущий метеорный след определялся формой метеороида и его динамикой в процессе разрушения метеорного тела. Метеорный след стал формироваться вблизи поверхности тела метеороида при его радиальном расширении и продольном сжатии, что согласуется с моделью мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической силы и поперечным расширением при разрушении метеорного тела упругими волнами. Зарегистрированный метеорный след “ухо-

дит” в обратном и радиальном направлениях по отношению к траектории полета основного метеороидного тела, что согласуется с работой [5]. Свечение метеорного следа может наблюдаться в течение ~10–40 мин в случае его горизонтального распространения и определяться классическими механизмами собственного свечения метеорного вещества и газовых составляющих атмосферы.

Полученные результаты предварительно позволяют говорить о новом типе метеорных следов, обладающих своими морфологическими особенностями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России и РФФИ (грант № 20-05-00520). Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rg.ru/ckp/3056/>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Астапович И.С.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1958.
2. *Бабаджанов П.Б.* Метеоры и их наблюдение. М.: Наука, 1987.
3. *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. М.: Наука, 1981.
4. *Иванов К.И., Комарова Е.С., Васильев Р.В. и др.* Исследование дрейфа метеорного следа по данным базисных наблюдений // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 1. С. 100–106. <https://doi.org/10.12737/szf-51201911>
5. *Григорян С.С.* О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космич. исслед. 1979. Т. 17. № 6. С. 875–893.
6. *Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф.* Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967.
7. *Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В. и др.* Долгоживущие метеорные следы // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 3. С. 130–139. <https://doi.org/10.12737/szf-53201913>
8. *Смирнов В.А.* Спектры кратковременных световых явлений: Метеоры. М.: Физматлит. 1994.
9. *Смирнов В.А.* Интерпретация излучения метеоров // Вісник Астрономічної школи. 2004. Т. 5. № 1–2. С. 189–194.
10. *Сыренова Т.Е., Белецкий А.Б., Васильев Р.В., Михалев А.В.* Оценка параметров метеорного следа на основе данных двухпозиционных оптических наблюдений. Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Тезисы докладов XXVI Международного симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2020.
11. *Clemesha B.R., de Medeiros A.F., Gobbi D. et al.* Multiple wavelength optical observations of a long-lived meteor trail // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. № 14. P. 2779–2782. <https://doi.org/10.1029/2000GL012605>
12. *Kelley M.C., Gardner C., Drummond J. et al.* First observations of long-lived meteor trains with resonance lidar and other optical instruments // Geophys. Res. Letts. 2000. V. 27. № 13. P. 1811–1814. <https://doi.org/10.1029/1999GL011175>
13. *Li G., Ning B., Chu Y.-H. et al.* Structural evolution of long-duration meteor trail irregularities driven by neutral wind // Geophys. Res. Space Physics. 2014. V. 119. № 10. P. 348–10, 357. <https://doi.org/10.1002/2014JA020116>

## ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ *MARCS-3* И *ФОБОС-2*: СОПОСТАВЛЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ *MGS* И *MAVEN*

© 2021 г. Т. К. Бреус<sup>1, \*</sup>, М. И. Веригин<sup>1</sup>, Г. А. Котова<sup>1</sup>, Дж. А. Славин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Университет Мичигана, Мичиган, США

\*breus36@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2021 г.

После доработки 13.06.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

21.1.1972 на космическом аппарате *Марс-3* было зарегистрировано сильное (~27 нТл) регулярное магнитное поле в районе наибольшего приближения аппарата к дневной стороне Марса. Обсуждалось множество гипотез, посвященных природе этого поля. Только в 1998 г. в миссии *Mars Global Surveyor (MGS)* удалось измерить намагниченность поверхности Марса и прояснить особенности сложной марсианской магнитосферы. Сравнение данных *Марс-3* с данными *MGS* показало, что в 1972 г. наблюдалось сильное и регулярное магнитное поле с таким же направлением и точно над областью самой сильной намагниченности марсианской коры в южном полушарии планеты. Таким образом, *Марс-3* зарегистрировал магнитное поле марсианской коры за четверть века до его открытия. Большие области намагниченности коры в южном полушарии на удалении от планеты создают существенный дипольный компонент в магнитном поле около Марса. Тем самым, Марс является уникальной планетой Солнечной системы, магнитосфера которой образуется при взаимодействии солнечного ветра с собственным магнитным полем коры и с ионосферой планеты. Предположение о гибридной природе марсианской магнитосферы было выдвинуто ранее по данным космического аппарата *Фобос-2*, хотя и связывалось с существованием внутреннего дипольного поля. Показано также, что данные космического аппарата *MAVEN* подтверждают вывод, сделанный по данным *Фобоса-2*, о более плотной горячей короне Марса, чем предполагалось ранее, и хорошо согласуются с результатами *Фобоса-2* по ускорению ионов в хвосте марсианской магнитосферы.

DOI: 10.31857/S0023420621060017

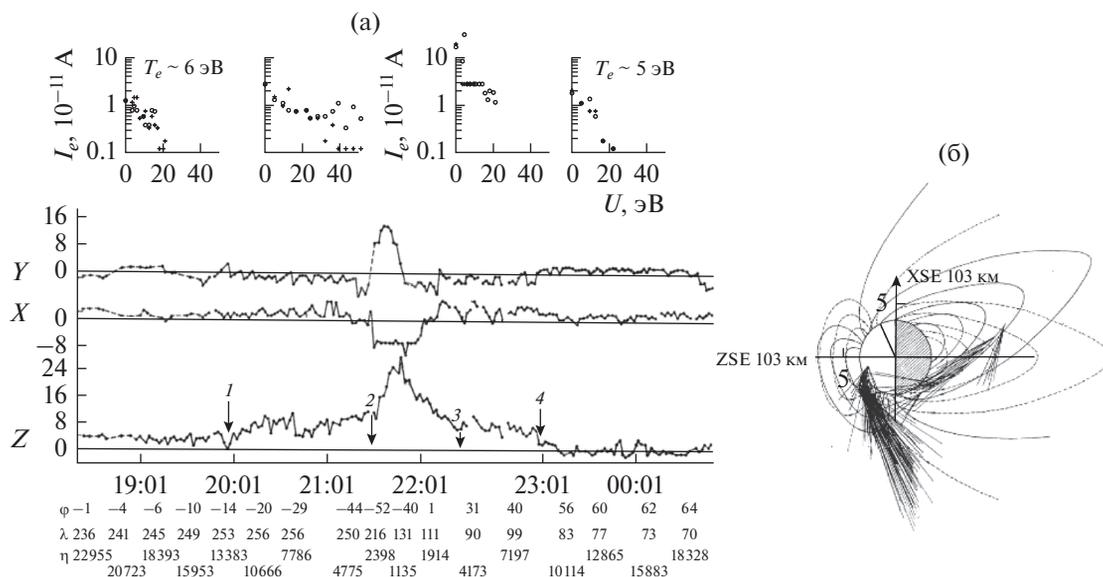
### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет, начиная с 1965 г., продолжают дискуссии о том, как происходит взаимодействие солнечного ветра с Марсом и какие морфологические особенности обнаруживаются в области этого взаимодействия. Марс оказался наиболее посещаемой космическими аппаратами планетой, причем, если поначалу это были американские и российские (советские) космические аппараты, то позднее в исследованиях Марса приняли участие Япония и Китай, и в настоящее время сразу два исследовательских аппарата вышли на орбиту красной планеты: *Надежда (Hope)* Объединенных Арабских Эмиратов, запущенная из Японии, и *Тяньвэнь-1* из Китая.

Первый из американских аппаратов *Mariner 4* с магнитометром для измерения напряженности магнитного поля и детектором заряженных частиц на борту, пролетел около Марса на расстоянии 9850 км на фланге планеты и зарегистрировал

возмущение магнитного поля [1]. Оно было позднее интерпретировано как пересечение ударной волны у Марса. Но магнитный эффект, который можно было бы связать с планетой, по мнению авторов экспериментов с магнитометром [2], не наблюдался, и дипольный момент Марса оценивался в  $3 \cdot 10^{-4}$  раз меньше, чем у Земли. Позднее возникла дискуссия о размере препятствия, создающего ударную волну у Марса, но поскольку пролет был далеко и на фланге планеты, то эти оценки масштаба препятствия и его природы колебались от 200 до 1620 км, а природа препятствия определялась как ионосферной плазмой, так и магнитным полем [2–6].

Около 50 лет назад, в конце 1971 г., космический корабль *Марс-3* был выведен на орбиту Марса. 21.1.1972 этот орбитальный аппарат зарегистрировал сильное (~27 нТл) и регулярное магнитное поле [7]. На рис. 1а представлены данные феррозондового магнитометра на борту орбитального аппарата *Марс-3*, полученные 21.1.1972

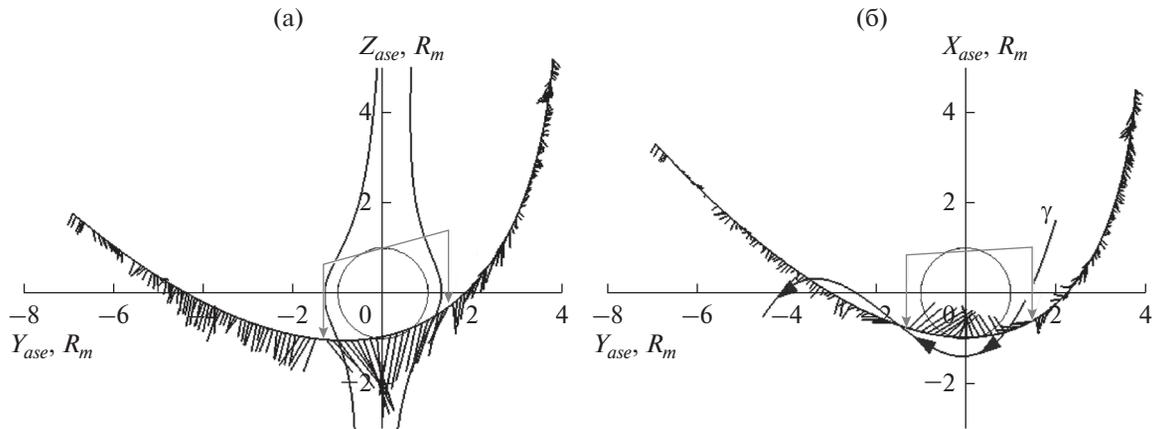


**Рис. 1.** (а) Измерения магнитного поля на борту *Марса-3* 21.I.1972 в солнечно-эклиптической системе координат [7]. Каждая точка соответствует среднему значению из 8 последовательных измерений. Вдоль оси абсцисс сверху вниз указано время московское, аэрографические широта ( $\varphi$ ) и долгота ( $\lambda$ ), высота над поверхностью в километрах ( $h$ ). Верхняя панель – спектры потоков электронов в солнечном ветре (слева – 16:49 Мск и справа – 22:59 Мск) и в магнитослое (в центре – 20:07, 22:43 Мск) при входе в магнитосферу планеты и выходе из нее [9]. (б) Интерпретация измерений с помощью наклонного планетоцентрического диполя (б) [8].

[7, 8]. Орбитальный аппарат сначала пересек головную ударную волну (1), затем дважды пересек магнитопаузу (2, 3) и вышел в солнечный ветер после окончательного пересечения околопланетной ударной волны (4). Самое сильное ( $\sim 27$  нТл) и регулярное магнитное поле было измерено в районе максимального сближения ( $\sim 1500$  км) *Марса-3* с планетой на дневной стороне [7, 8]. На верхней панели рис. 1а показаны измеренные на *Марсе-3* спектры потоков электронов последовательно до пересечения ударной волны и в магнитослое до пересечения магнитопаузы и после пересечения магнитопаузы и ударной волны, соответственно [9]. Спектры в центре панели соответствуют значительно более термализованным потокам электронов, чем крайние спектры, как и должно быть в магнитослое по сравнению с солнечным ветром, и это подтверждает приведенную интерпретацию пересечений плазменных границ около Марса.

Результаты по магнитному полю были интерпретированы первоначально как свидетельство существования наклонного планетоцентрического диполя (рис. 1б), и планетарный дипольный магнитный момент Марса был оценен как  $M = 2.4 \cdot 10^{22}$  Гс см<sup>3</sup> [7, 8, 9]. Таким образом, была выдвинута гипотеза а): *Марс имеет собственное дипольное поле и соответствующую магнитосферу*. Следует отметить, что авторы [7] допускали вероятность палеомагнитной природы марсианского поля.

Позднее в 1978 г. [10] К. Рассел пришел к выводу, что космический аппарат *Марс-3* не входил в магнитосферу планеты и “наблюдаемое магнитное поле на *Марсе-3* “задрапировано” вокруг Марсианского препятствия, как ожидается, если это поле представляет собой сжатое магнитное поле солнечного ветра”. Из анализа положения и формы ударных волн, наблюдавшихся около Земли, Меркурия, Венеры и Марса [11], К. Рассел хотя и не отрицал возможного наличия слабого собственного магнитного поля Марса, отстаивал гипотезу о несущественности этого поля во взаимодействии с солнечным ветром, т.е. б) *взаимодействие солнечного ветра с Марсом происходит подобно Венере*. Однако, по измерениям магнитного поля в невозмущенном солнечном ветре можно рассчитать направление магнитного поля в области его “сжатия” (рис. 2) [12]. На рис. 2 показаны проекции траектории спутника *Марс-3* вблизи перигея в аэроцентрической системе координат  $ase$ , учитывающей аберрацию солнечного ветра из-за движения планеты по орбите ( $x_{ase}$  – направлена против скорости набегающего потока солнечного ветра), отрезки черных линий показывают величину и направление магнитного поля. Линия  $\gamma$  со стрелками на рис. 2б показывает направления магнитного поля, которые должны были бы наблюдаться при простом драпировании магнитного поля невозмущенного солнечного ветра вокруг планеты. Видно, что проекции поля на оси X и Z в зоне ближайшего сближения, отме-



**Рис. 2.** Постоянство знака проекции вектора магнитного поля на оси  $X$  (2б) и  $Z$  (2а) вблизи точки максимального сближения КА *Марс-3* с Марсом (вертикальные стрелки на рис. 2а и 2б) а — вид от Солнца, б — вид с Севера.

ченной вертикальными стрелками, не меняют знак, что невозможно при драпировании поля вокруг планеты, поэтому вывод авторов [10] выглядит несовместимым с наблюдавшимся направлением магнитного поля.

После анализа данных ранних миссий *Марс-2*, *-3*, *-5* авторы [13] признали существование небольшого собственного поля планеты в марсианской магнитосфере. Они показали, что ионосфера Марса не может поддерживать ионосферу типа Венеры на высотах препятствия, полученных в результате моделирования наблюдений головной ударной волны, даже когда предполагаются максимальные индуцированные магнитные поля ионосферы и максимальные уровни потока ультрафиолетового излучения от Солнца. Авторы [13] оценили эффективный магнитный дипольный момент Марса  $M = 1.4 (\pm 0.6) \cdot 10^{22}$  Гс см<sup>3</sup>, а высота границы магнитосферы, создаваемой этим магнитным моментом над дневным полушарием Марса, может быть на высотах  $\sim 500$  км в подсолнечной точке и  $\sim 1000$  км вблизи терминатора без вклада ионосферы в условиях среднего давления солнечного ветра. Опубликованные радиозатменные измерения не дали никаких доказательств существования ионопаузы на Марсе, что также согласуется с исследованием на *Викингах*, проведенным в [14].

В 1988 г. стартовала советская миссия изучения Марса *Фобос*. Несмотря на то, что основная задача — доставка на поверхность *Фобоса* спускаемых аппаратов для изучения этого спутника Марса — осталась невыполненной, плазменная среда около Марса была исследована достаточно подробно. 29.I.1989 г. российский космический аппарат *Фобос-2* вышел на орбиту искусственного спутника Марса. На этом космическом аппарате были установлены комплексы приборов для исследования плазмы, энергичных частиц и маг-

нитного поля в межпланетной и околопланетной среде. До перевода аппарата на круговую орбиту на 4-х эллиптических орбитах были проведены измерения до высоты 850 км. Наблюдалось возращание магнитного поля до 20–30 нТ и уменьшение потоков протонов солнечного ветра до уровня чувствительности приборов.

По данным *Фобоса-2*, с одной стороны, Е.Г. Ерошенко с соавторами [15] показали, что направление магнитного поля в долях хвоста зависит от направления межпланетного магнитного поля, аналогично ситуации около Венеры, не имеющей собственного магнитного поля, то есть Марсианское препятствие имеет существенный индуцированный компонент. С другой стороны, М.И. Веригин с соавторами обнаружили, что толщина хвоста марсианской магнитосферы обратно пропорциональна динамическому давлению солнечного ветра в степени  $1/6$ , что характерно для Земли, имеющей собственное дипольное магнитное поле [16]. На основании этих двух фактов была предложена гибридная модель взаимодействия солнечного ветра с Марсом, основанная на представлении о комбинированной природе препятствия, в котором существенную роль играют и планетное магнитное поле, и ионосфера. При этом гипотеза о природе магнитного поля а) осталась неподтвержденной, ибо орбиты *Фобоса-2* проходили достаточно высоко над планетой.

Космическим аппаратом, достигшим Марса 11.IX.1997, был американский аппарат *MGS (Mars Global Surveyor)*. Было открыто существование на Марсе областей локальных магнитных аномалий [17–20]. Оказалось, что они достаточно мощные в южном полушарии, чтобы оказывать существенное влияние на характер взаимодействия солнечного ветра с планетой.

Задачей данной работы является подтверждение и обоснование уникальной комбинирован-

ной природы Марсианского препятствия в потоке солнечного ветра. Аномальная неравномерная намагниченность коры Марса создает небольшое, но значимое крупномасштабное магнитное поле с наиболее выраженной дипольной составляющей. Из-за изменчивых условий в солнечном ветре в разные периоды измерений то “ионосферный”, то “магнитный” компонент преобладает во взаимодействии с планетой, и данные могут свидетельствовать как в пользу взаимодействия по типу Венеры, так и в пользу взаимодействия по типу Земли.

### ОТКРЫТИЕ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ НА МАРСЕ И СОПОСТАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, ИЗМЕРЕННЫХ *MGS* И *МАРСОМ-3*

Космический аппарат *MGS* достиг Марса 11.IX.1997. Данные магнитометра *MGS* были получены в высотном интервале от 80 до 450 км. Магнитное поле в обнаруженных локальных магнитных аномалиях [17–20] достигало 1600 нТл на высоте 100 км, и образования коры с разной полярностью магнитного поля были порой вытянуты вдоль долготы на тысячи километров [20]. Это свидетельствовало о существовании у Марса в прошлом магнитного динамо.

Для объяснения данных по магнитному полю, полученных Долгиновым и др. [7, 8] мы исследовали область на поверхности Марса, над которой проходила траектория *Марса-3*. На рис. 3 представлены карты горизонтального магнитного поля Марса в ареографических координатах долгота – широта, полученные путем усреднения данных *MGS* [20] по интервалам  $1^\circ \times 1^\circ$ , 360 интервалов по долготы и 180 интервалов по широте, во время картирующей фазы полета на высоте 370 – 438 км над поверхностью планеты в течение марта 1999 – августа 2000 гг. Светлые области на рис. 3а, 3б представляют сложное распределение горизонтальной составляющей магнитного поля марсианской коры на высоте около 400 км над поверхностью планеты, полученное из измерений *MGS*. Плавные белые линии на рис. 3а, 3б представляют собой часть траектории *Марса-3* в тех же координатах ареографическая долгота ( $\lambda$ ) – ареографическая широта ( $\varphi$ ) [12] вблизи наибольшего сближения аппарата с планетой.

Магнитное поле на участке траектории вблизи центра аномалии выделено белым, на остальной части траектории показано серым цветом. Длины и направления белых отрезков на рис. 3а показывают горизонтальную составляющую магнитного поля  $(B_\lambda^2 + B_\varphi^2)^{1/2}$ , измеренного *MGS* вдоль проекции траектории *Марса-3* на поверхность орбиты *MGS* (~400 км над поверхностью Марса), усредненную по  $15^\circ$ , а длины и направления белых от-

резков на рис. 3б – тот же компонент, полученный при измерениях магнитного поля на *Марсе-3*.

Тот факт, что пролет *Марса-3* проходил именно над областью наибольшей намагниченности коры, а также явное подобие полей (см. центральный участок проекции траектории и белые вектора горизонтальных проекций магнитного поля на рис. 3а и 3б) свидетельствуют о том, что орбитальный аппарат *Марс-3* наблюдал сильное и регулярное магнитное поле в области самой сильной намагниченности марсианской коры в южном полушарии планеты, обнаруженной по измерениям *MGS*. Подобие состоит в почти коллинеарности проекций векторов (белые отрезки на рис. 3а и 3б) магнитного поля и близости их модулей по порядку величины вблизи центра аномалии по данным обоих орбитальных аппаратов. Чтобы однозначно доказать соответствие между полем над аномалиями и полем, измеренным на *Марс-3*, надо построить трехмерную модель распределения поля над аномалиями. Конкретное магнитное поле внутри магнитосферы над конкретной областью поверхности выглядит достаточно сложно. Для таких моделей нужны, прежде всего, хотя бы относительно достоверные данные о распределении поверхностных полей в аномалиях, или модели такого распределения. Поверхностными полями аномалий занимались различные авторы (например, [21–23]). Однако эти и другие модели многократно критиковались. На данный момент авторам неизвестно о существовании какой-либо модели магнитного поля Марса, пригодной для количественного расчета на произвольном расстоянии от поверхности. Поэтому вопрос о точной конфигурации мини-магнитосферы над аномалиями требует дальнейшего исследования.

Авторы считают, что *Марс-3* действительно обнаружил магнитное поле марсианской коры в начале 1972 г., примерно за 25 лет до *MGS*.

Разумеется, до открытия намагниченности Марсианской коры на *MGS*, наблюдения *Марса-3* не были должным образом интерпретированы и сопровождались описанной выше длительной дискуссией о природе обнаруженного поля, различными оценками магнитного момента, создавшего это поле и т.д.

### ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С МАРСОМ

Магнитные аномалии имеют различные масштабы и в основном находятся в южном полушарии планеты. Они образуют мини – магнитосферы, различной протяженности. В северном полушарии Марса мини-магнитосферы обычно имеют небольшие размеры и не достигают высот 400 км. В противоположность, вблизи экватора и в юж-

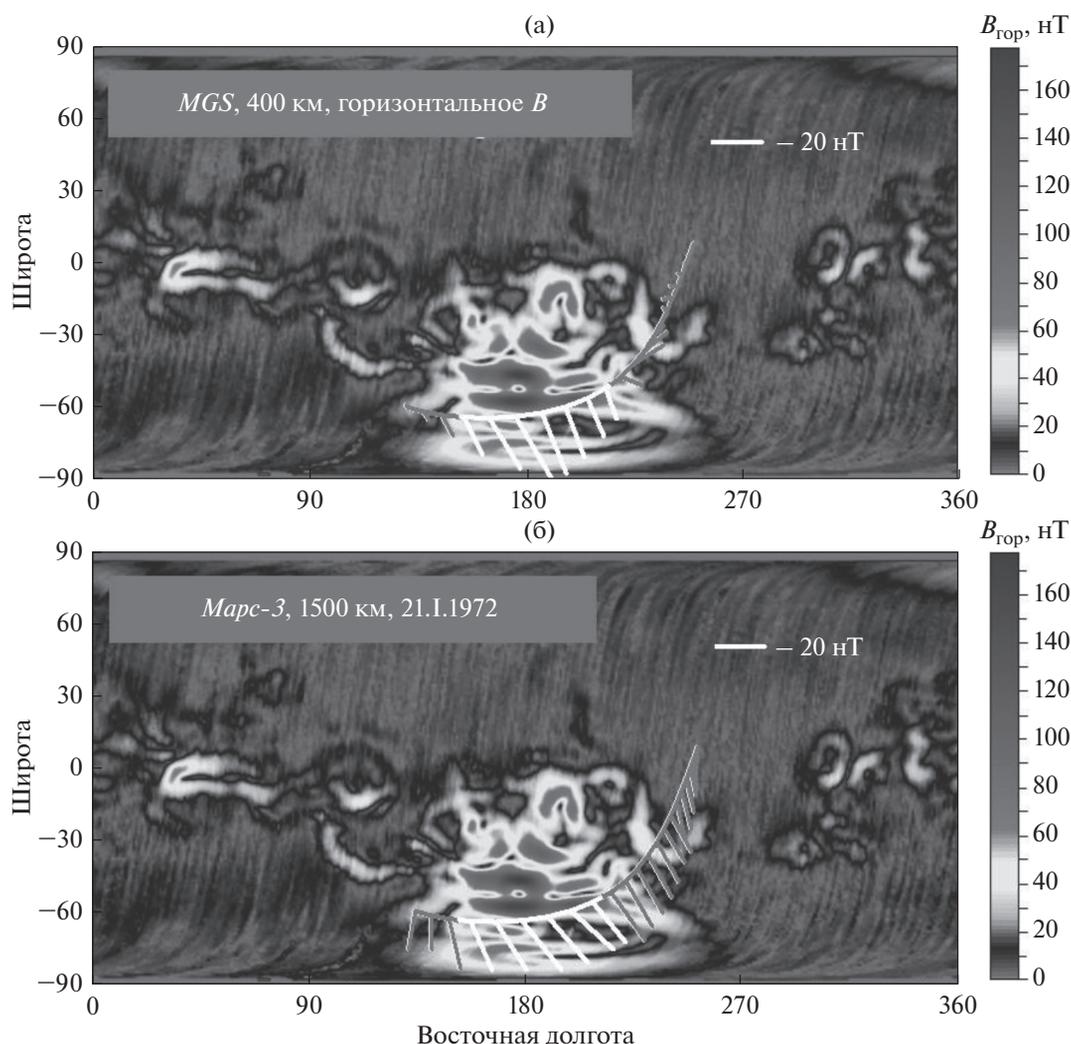


Рис. 3. Распределение горизонтальной составляющей магнитного поля марсианской коры на высоте 400 км над поверхностью планеты [20].

ном полушарии доминируют мини-магнитосферы большего размера, которые достигают высот 800 км и более (см. ниже рис. 10 и его описание).

Локальные, но многочисленные магнитные аномалии могут создавать эффективное крупномасштабное поле (рис. 4) [18, 24, 25]. При малых углах относительно местного зенита ( $<30^\circ$ ) эффективный магнитный поток  $\Phi_3$  через сферическую оболочку представляется положительным (направленным от планеты) — это области исходящего потока магнитного поля. При больших углах ( $>150^\circ$ ) эффективный магнитный поток  $\Phi_3$  направлен к планете. Такие регионы являются областями входящего потока. При углах от  $60^\circ$  до  $120^\circ$  — потоки магнитного поля в основном замкнуты и направлены из областей исходящего потока к областям входящего потока. Это свидетельствует о том, что в мультипольном моменте планеты Марса существует немаловажная ди-

польная составляющая. На основании расчетов магнитного поля на поверхности Марса, выполненных Arcani-Nameed [26] по данным MGS, дипольную составляющую магнитного момента планеты можно оценить, как  $4 \cdot 10^{21}$  Гс см<sup>3</sup>.

MGS не имел на борту приборов для измерения характеристик протонов, поэтому он не мог определить границу, подобную той, которую наблюдал Фобос-2. Однако MGS обнаружил слой, в котором увеличение магнитного поля до 20–30 нТл сопровождалось уменьшением потока электронов в основном в интервале энергий от 20 до 200 эВ [27, 28]. Также волновая активность в этом слое уменьшалась по мере уменьшения высоты. Внешняя граница этого слоя была названа MPb — граница магнитного нагребания (Magnetic Pileup boundary) [28]. Следует отметить, что использовались и много других терминов для этой границы. Дубинин с соавторами [29] по данным ионного

спектрометра ASPERA на космическом аппарате *Фобос-2* сравнили положения различных плазменных образований, ограничивающих марсианский хвост магнитосферы, — “граница ионного состава”, “прекращение потоков протонов”, “пик электронной плотности”, и продемонстрировали, что их положения и вариации в целом совпадают с особенностями магнитопаузы, полученными по данным спектрометра TAUS [30] (см. рис. 6). Далее будем использовать термин МРб [31].

По данным *MGS* было показано, что граница МРб находится дальше от Марса в южном полушарии, чем в среднем в северном полушарии. Этот эффект очевиден при изучении зависимости наблюдаемых пересечений от широты после проецирования точек пересечения МРб на плоскость терминатора [32].

Влияние намагниченности коры Марса на положение МРб было также проанализировано с помощью карт магнитного поля на высоте 400 км над поверхностью планеты [20]. В связи с тем, что на *MGS* не проводились измерения ионов солнечного ветра, динамическое давление солнечного ветра оценивалось по максимальному значению величины магнитного поля внутри МРб, а также по направлению этого поля [33]. Для возможности сопоставления с данными *Фобоса-2* рассматривались данные *MGS* только, когда динамическое давление попадало в интервал  $0.5 < \rho V^2 < 1.4$  нПа. Для аппроксимации поверхности МРб использовалось выражение:  $\rho = \frac{D}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{\pi}{D} \sqrt{2r_0(r_0 - x_{ase})} \right)$ ,  $\rho =$

$= \sqrt{(y_{ase}^2 + z_{ase}^2)}$ , где  $D$  и  $r_0$  — параметры, описывающие диаметр хвоста Марса на бесконечном удалении от планеты и расстояние от центра планеты до подсолнечной точки границы, соответственно. На рис. 5 показаны аппроксимации границы МРб по данным *MGS* для случаев пересечения границы, когда горизонтальный компонент магнитного поля был менее 10 нТл (верхние панели) на высоте 400 км под линией тока магнитослоя, примыкающей к МРб и соединяющей носовую точку с точкой наблюдения МРб, и более 40 нТл (нижние панели). Параметры аппроксимации границы для случаев ее пересечения при низкой намагниченности коры Марса под соответствующей линией тока были  $D = 19430$  км и  $r_0 = 4180$  км (рис. 5, верхняя панель), а при высокой намагниченности коры —  $D = 23950$  км и  $r_0 = 4470$  км (рис. 5, нижняя панель). Таким образом, локальная намагниченность коры Марса приводит к увеличению толщины хвоста магнитосферы в области орбиты *Фобоса-2* на 500–1000 км, увеличению подсолнечного расстояния от центра планеты до МРб на несколько сотен километров, а также к некоторому увеличению расстояния от планеты до ударной волны [33, 34].

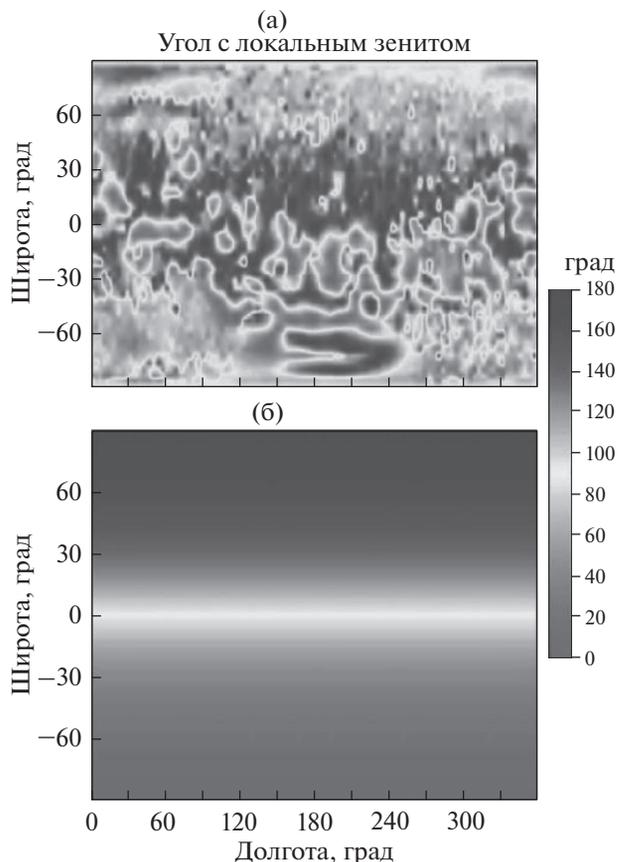
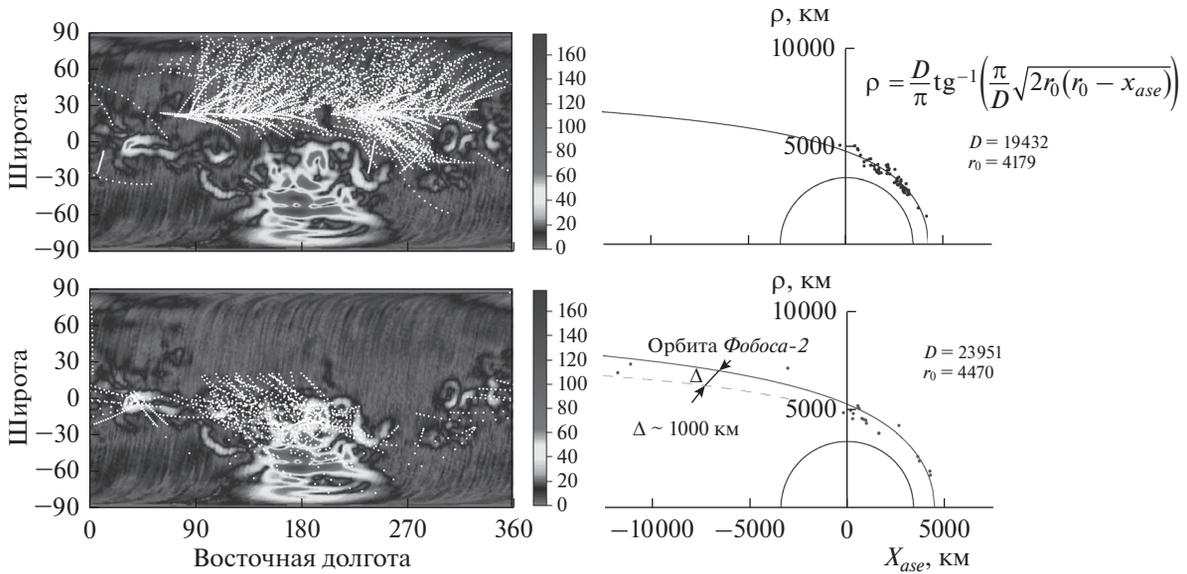


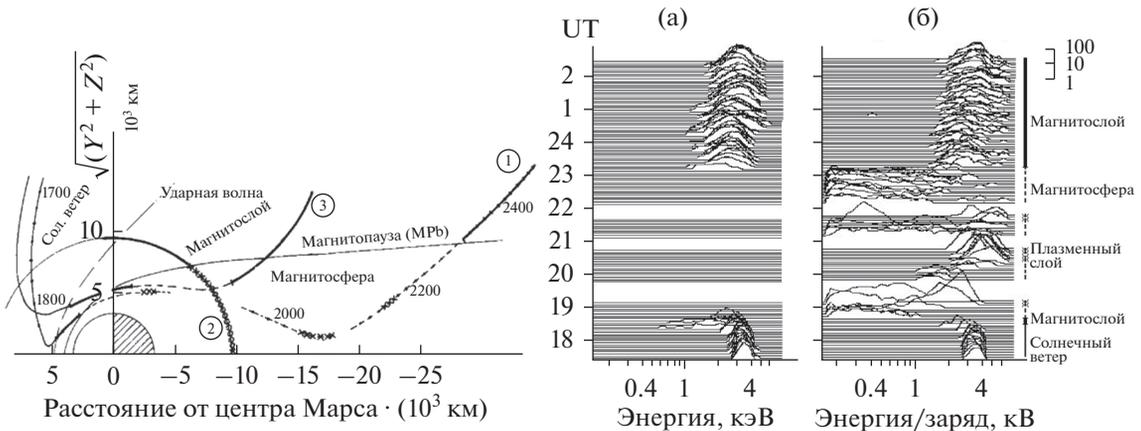
Рис. 4. (а) Карта угла магнитного поля относительно местного зенита, полученная с помощью *MGS*. (б) Аналогичная карта только для центрального осевого диполя [18, 20, 24, 25].

#### МОДЕЛЬ ГРАНИЦЫ МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА И “ПЕРЕХОДНОЕ” ДАВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

На рис. 6 продемонстрировано пересечение космическим аппаратом *Фобос-2* различных плазменных границ и образований при его движении по орбите вокруг Марса. Траектории спутника *Фобос-2* и для сравнения траектория *Марса-5* показаны в аэроцентрической системе координат  $ase$ , учитывающей абберацию солнечного ветра из-за движения планеты по орбите. Справа показаны усредненные за 4 мин интервалы времени энергетические спектры протонов (6а) и тяжелых ионов (6б), измеренные в эксперименте TAUS 1–2. II.1989 при первом пролете *Фобоса-2* по эллиптической орбите [30, 35]. Энерго-масс-анализатор TAUS, успешно работавший на космическом аппарате *Фобос-2*, был разработан для измерения энергетических (150 эВ–6 кэВ) и угловых ( $40^\circ \times 40^\circ$ ) спектров протонов, альфа-частиц и ионов с отношением масса/заряд  $>3$ . Этот прибор представлял собой систему двух полусферических анализаторов, включенных последовательно, с



**Рис. 5.** Слева: проекции орбит *MGS* (линии белых точек) на карту магнитных полей Марса в случаях, когда ниже линии тока магнитослоя, проходящей через наблюдаемое положение МРб регистрировалось слабое (вверху) или сильное (внизу) магнитное поле. Справа: сравнение пересечений МРб (черные точки) космическим аппаратом *MGS* на орбитах, приведенных слева. Тонкие линии справа – аппроксимации показанных пересечений МРб. Справа штриховая линия на нижнем рисунке повторяет аппроксимацию МРб на верхнем рисунке для сравнения [20, 33, 34].



**Рис. 6.** (Слева) Траектории спутников *Фобос-2* – 1.П.1989 (1) и 2.П.1989 (2) и *Марс-5* – 13.П.1974 (3). Тонкими сплошными линиями отмечены участки траекторий в солнечном ветре, полужирными линиями – в магнитослое, пунктиром в магнитосфере Марса. В областях, помеченных крестиками, наблюдались потоки тяжелых ионов, текущие в хвост.

ускоряющим промежутком между ними. Разделение протонов,  $\alpha$ -частиц и тяжелых ( $m_i/q > 3$ ) ионов осуществлялось с помощью магнитной системы, расположенной в средней части второго анализатора. Из рис. 6 по смещению максимума в спектрах протонов в сторону более низких энергий видно, что солнечный ветер начинает тормозиться еще перед ударной волной (~18.25 UT). Внутри магнитосферы существует плазменный слой, образованный тяжелыми ионами (рис. 6б). (Токи на рис. 6б увеличены в 32 раза по сравнению с токами на рис. 6а). Следует отметить, что в канал тя-

желых ионов попадала также незначительная часть протонов, однако их легко выделить при сравнении с одновременно измеренными протонными спектрами (рис. 6а). Видно также, что вблизи границы магнитосферы наблюдаются низкоэнергичные потоки тяжелых ионов (рис. 6б). Такие потоки наблюдались и на большинстве круговых орбит *Фобоса-2*. В тех частях магнитосферы, где присутствуют потоки тяжелых ионов с меньшей энергией, энергетические спектры электронов также имеют пик (часто весьма широкий) при энергиях ~20–30 эВ [36]. Эти измерения, ве-

роятно, проводились в пограничном слое марсианской магнитосферы [37]. В отличие от околоземного пограничного слоя (для этого слоя использовалось много других названий: диффузная граница магнитосферы, плазменная мантия, входной слой, низкоширотный пограничный слой), состоящего в основном из протонов, марсианский пограничный слой состоит преимущественно из тяжелых ионов с отношением масса/заряд  $>3$ .

Характерные особенности поведения плазмы и магнитного поля, обнаруженные по данным *Фобоса-2*, вновь привели авторов работ [30, 34, 38, 39] к концепции о том, что магнитопауза или МРб представляет собой достаточно резкую границу в потоке солнечного ветра.

По данным *Фобоса-2* Веригиным с соавторами [16, 39] была предложена гибридная модель магнитопаузы (МРб) Марса. Для описания формы этой границы использовалось уравнение баланса давлений, в котором давление солнечного ветра включает динамическое, тепловое и магнитное давления, а давление магнитосферы включает ионосферное и магнитное давления:

$$\begin{aligned} k\rho V^2 \sin^2 \alpha + p &= \frac{4f^2 M^2}{8\pi r^6} + p_0 e^{-\frac{r-r_0}{H}}, \quad x > x^*, \\ &= \frac{B^{*2}}{8\pi} \left(\frac{y^*}{y}\right)^4, \quad x < x^*, \\ x &= x_{ase}, \quad y = \sqrt{y_{ase}^2 + z_{ase}^2}. \end{aligned}$$

Здесь — координаты поверхности МРб в аберрированной планетоцентрической солнечно-эклиптической системе координат ( $x_{ase}$  — направлена против скорости набегающего потока солнечного ветра),  $\alpha$  — угол между направлением  $x_{ase}$  и касательной к поверхности МРб в плоскости, проходящей через  $x_{ase}$ .  $\rho V^2$  — динамическое давление солнечного ветра,  $p$  — сумма теплового и магнитного давлений солнечного ветра,  $M$  — магнитный момент Марса,  $p_0$  — давление ионосферы на расстоянии  $r_0$  от центра планеты,  $H$  — шкала высот  $k = 0.88$  (для показателя политропы  $\gamma = 5/3$ ) и  $f \approx 1.22$  ( $f^2/k \approx 1.69$ ) — коэффициенты передачи динамического давления солнечного ветра границе в подсолнечной области и усиления магнитного поля из-за текущих вдоль границы токов, соответственно [13, 40]. Предполагалось, что магнитный поток сохраняется в хвосте магнитосферы Марса при  $x \leq x^* \leq 0$ . Для расчетов использовалось значение  $x^* = 0$ .

Модель была построена по данным *Фобоса-2*, полученным в период максимума солнечной активности в феврале—марте 1989 г. (рис. 7). Модель хорошо описывает наблюдавшиеся несколько пересечений границы магнитосферы с дневной стороны, соотношение между динамическим давлением солнечного ветра и положением границы в

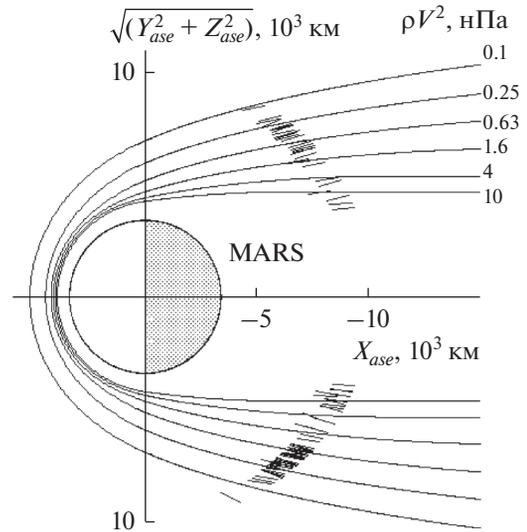


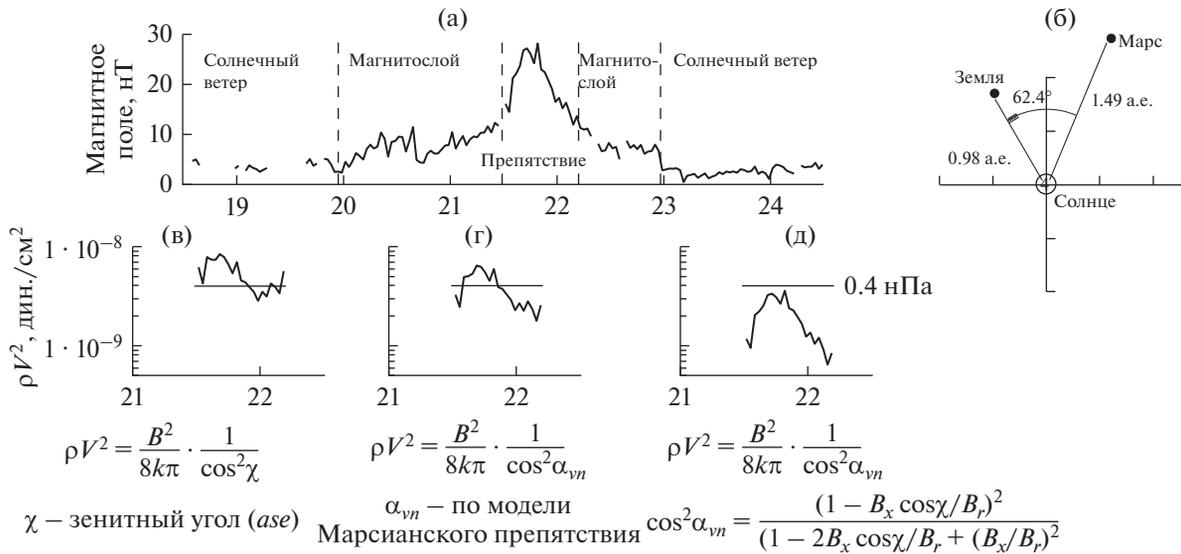
Рис. 7. Модельное положение МРб для различных динамических давлений солнечного ветра. Отрезки кривой указывают угол наклона поверхности МРб на круговых орбитах *Фобоса-2* [39].

хвосте магнитосферы и зависимость угла наклона МРб к направлению скорости солнечного ветра от его динамического давления [39]. Магнитный момент Марса рассматривался как один из параметров модели и по оценкам составил  $8 \cdot 10^{21}$  Гс см<sup>3</sup>, что только в 2 раза отличается от оценки, сделанной по измерениям магнитного поля на *MG5* [26].

Гибридная модель МРб, учитывающая влияние магнитного поля и ионосферы Марса, обладает характерной особенностью. Модель описывает стагнацию положения МРб в подсолнечной области при динамическом давлении солнечного ветра  $>0.6$  нПа, в то время, как хвост магнитосферы Марса остается сжимаемым вплоть до очень больших значений значений динамического давления солнечного ветра (рис. 7).

Эта модель МРб позволила М.И. Веригину с соавторами [39, 41] объяснить также вариации положения ударной волны около Марса в плоскости терминатора, которое не зависит от динамического давления солнечного ветра. Такое поведение ударной волны связано с неинвариантностью формы поверхности МРб, удаленная от планеты часть которой сжимается, как у Земли, а подсолнечная область остается стабильной начиная с достаточно низких значений  $\rho V^2$ .

Таким образом, при моделировании поверхности МРб (рис. 7) была получена величина некоторого переходного динамического давления солнечного ветра, при низком динамическом давлении  $<0.6$  нПа в процессах взаимодействия солнечного ветра с планетой преобладает влияние собственного магнитного поля планеты, то есть,



**Рис. 8.** Оценка давления солнечного ветра вблизи Марса 21.1.1972 и ее сопоставление с измерениями магнитного поля на *Марсе-3* [12]; (в) для оценки давления солнечного ветра, которое было необходимо для баланса давления магнитного поля планеты используется зенитный угол; (г) для оценки необходимого давления солнечного ветра используется угол  $\alpha_{vn}$  между вектором скорости набегающего потока и нормалью к поверхности МРб, рассчитанный по методике [28, 32]; (д) для оценки используется угол  $\alpha_{vn}$ , но рассчитанный по модели МРб, предложенной в [33].

как показали измерения на *MGS*, остаточная намагниченность коры планеты, в то время как при высоком давлении солнечного ветра  $>0.6$  нПа преобладают эффекты отклонения солнечного ветра ионосферой планеты.

Теперь возникает вопрос: “Могло ли давление магнитного поля, наблюдавшегося на *Марсе-3*, сбалансировать динамическое давление солнечного ветра на МРб?”

#### БАЛАНС ДАВЛЕНИЙ ВО ВРЕМЯ ПРОЛЕТА *МАРСА-3* 21.1.1972 ОКОЛО МАРСА

Давление солнечного ветра во время измерений магнитного поля аппаратом *Марс-3* 21.1.1972 (рис. 8а) можно оценить с помощью данных, работавшего тогда орбитального аппарата Земли *IMP-6* (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/>). К сожалению, данные по измерениям ионов солнечного ветра на *Марсе-3* за нужное время отсутствуют. В этот период гелиоцентрические расстояния до Земли и Марса составляли 0.98 а. е. и 1.49 а. е. соответственно, в то время как Земля опережала Марс на  $62.4^\circ$  (см. рис. 8б). Таким образом, со скоростью 455 км/с (*IMP-6*) солнечный ветер, излучаемый из определенного места солнечной короны, достигает Марса на 2.8 дня раньше Земли. С учетом углового смещения параметры солнечного ветра на орбите Земли были следующие: плотность протонов  $n_p = 2.6 \text{ см}^{-3}$ , температура протонов  $T_p = 1.35 \cdot 10^5 \text{ К}$ , отношение плотности альфа-частиц к плотности протонов  $n_\alpha/n_p = 0.01$ .

После радиального масштабирования можно оценить параметры солнечного ветра вблизи Марса:  $n_p = 2.6 \cdot (0.98/1.49)^2 = 1.1 \text{ см}^{-3}$ ,  $T_p = 1.35 \cdot 10^5 \cdot (0.98/1.49)^{2/3} = 10^5 \text{ К}$ . Динамическое давление солнечного ветра:  $\rho V^2 = n_p m_p V^2 \left(1 + \frac{n_\alpha m_\alpha}{n_p m_p}\right) \approx 0.4 \text{ нПа}$ .

Следовательно, 21.1.1972 измерения магнитного поля на *Марсе-3* (рис. 8б) были выполнены в условиях низкого давления солнечного ветра, ибо среднее динамическое давление солнечного ветра около Земли составляет 2 нПа, что соответствует среднему динамическому давлению около Марса  $2 \cdot (0.98/1.49)^2 \sim 0.9 \text{ нПа}$ . В этот период времени динамическое давление солнечного ветра вблизи Марса было также меньше переходного давления, рассмотренного выше, то есть влияние намагниченности коры преобладало в обтекании планеты солнечным ветром.

По измерениям магнитного поля в интервале времен 21:29–22:12, отмеченному на рис. 8а как препятствие, можно рассчитать динамическое давление солнечного ветра, которое должно было быть, чтобы сбалансировать наблюдаемое давление магнитного поля, создающее препятствие потоку солнечного ветра. Это рассчитанное давление необходимо сравнить с тем реальным давлением солнечного ветра, которое было в тот момент около Марса, по полученной выше оценке – это 0.4 нПа. При рассматриваемой интерпретации наблюдательных данных вклада ионосферной плазмы в давление на границе быть не может,

поскольку пересечение МРб произошло далеко от планеты. Пересечение МРб наблюдалось не в лобовой точке, где давление солнечного ветра (с точностью до коэффициента передачи  $f^2/k$  [39]) просто равно магнитному давлению, поэтому для расчета давления солнечного ветра необходимо использовать какую-то модель границы препятствия. На рис. 8в–8д динамическое давление солнечного ветра, рассчитанное по различным моделям околосолнечного препятствия, сопоставляется с полученной выше оценкой этого давления по имеющимся измерениям. На рис. 8в для оценок используется зенитный угол, на рис. 8г – оценки выполнены по методике [28] и модели [32], на рис. 8д использована методика [33]. Необходимое давление солнечного ветра, полученное по этой последней методике, даже меньше того, которое получено по реальным измерениям солнечного ветра. Из рис. 8 видно, что по всем оценкам давления магнитного поля, измеренного 21.1.1972, достаточно для баланса набегающего потока солнечного ветра на МРб.

Эта была редкая удача, когда эксперимент был выполнен в нужное время в нужном месте и с очень хорошим временным разрешением. На минимальной высоте, т.е. вблизи перигея, спутник *Марс-3* находился над областью сильной намагниченности коры планеты, да еще и в период времени, когда давление солнечного ветра было низким. При высоком давлении солнечного ветра и над областью низкой намагниченности коры планеты спутник бы оказался за пределами магнитосферы и ничего особенного бы не зарегистрировал. Только комбинация этих условий позволила получить эти данные. Конечно, до измерений на *MGS* было невозможно предположить столь сложную структуру марсианского поля, и были попытки других объяснений рассматриваемых данных *Марс-3* [8, 10, 13]. Данные, полученные на спутнике *Марс-3* Долгиновым с коллегами [7, 8], могут быть использованы для построения моделей изменения магнитного поля в мини-магнитосферах над главными аномалиями коры Марса.

#### ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОКОЛО МАРСА

С помощью плазменных экспериментов TAUS [30] и HARP (Прибор HARP предназначался для исследования функций распределения по энергиям и направлениям электронов и ионов, приходящих с антисолнечного направления [36]) и магнитного эксперимента МАГМА [42] на борту космического корабля *Фобос-2* в хвосте марсианской магнитосферы был обнаружен плазменный слой, окружающий магнитный нейтральный слой. В от-

личие от земного плазменного слоя, который образован в основном протонами, марсианский плазменный слой в основном состоит из планетарных тяжелых ионов, ускоренных в хвосте [30, 38]. Анализ энергетических и угловых спектров ионов с отношением массы ( $m$ ) на заряд ( $q$ )  $m/q > 3$  показал, что в ускорении ионов главную роль играют 2 процесса [43].

Существенную роль играет ускорение в центральном токовом слое благодаря действию электрического поля, направленного поперек магнитного хвоста. Максимальная величина потоков тяжелых ионов в хвосте магнитосферы обычно наблюдается при пересечении нейтрального слоя, который легко идентифицировать по изменению знака  $B_x$  – компонента магнитного поля. На большинстве круговых орбит космический аппарат *Фобос-2* стабилизировался вращением вокруг оси, ориентированной на Солнце, поэтому точно определить компонент магнитного поля в плоскости, перпендикулярной оси вращения  $X$  было невозможно. Тем не менее, оценить составляющую магнитного поля, нормальную к плоскости нейтрального слоя, можно. Момент разворота поля, изменения знака  $B_x$  – компонента, соответствует наблюдению минимального значения полной величины магнитного поля. И эта минимальная величина магнитного поля  $B_{\min}$  в хвосте магнитосферы соответствует полю, направленному перпендикулярно нейтральному слою, и наблюдается одновременно с максимальной скоростью тяжелых ионов  $V_i$ . При этом  $V_i$  пропорционально  $1/B_{\min}$  и в соответствии с теоретическими ожиданиями [44–46] аппроксимируется зависимостью  $V_i = 2E/B_{\min}$ , где электрическое поле поперек хвоста  $E \approx 0.35$  мВ/м (рис. 9а).

Другим рассмотренным механизмом ускорения ионосферных ионов является ускорение за счет натяжения магнитных силовых линий. На рис. 9б представлена зависимость давления потока тяжелых ионов  $\rho V_i^2$  от величины  $B_x^2 B_{\min} / T_i^{1/2}$  ( $B_x$  – магнитное поле вдоль хвоста,  $T_i$  – температура ионов), связь этих параметров должна наблюдаться при ускорении ионов вследствие натяжения силовых линий магнитного поля [43].

Значение вышеописанных двух процессов ускорения тяжелых ионов было рассмотрено для условий высокого и низкого динамического давления солнечного ветра в [43]. На рис. 9 данные разделены по величине динамического давления солнечного ветра  $\rho V^2$ , измеренного на той же орбите спутника *Фобос-2* до или после пересечения хвоста Марсианской магнитосферы. Точки соответствуют измерениям при высоком динамическом давлении солнечного ветра  $\rho V^2 > 0.6$  нПа, крестики – при низком  $\rho V^2 < 0.6$  нПа. Видно, что на рис. 9а лучше корреляция для крестиков, и это

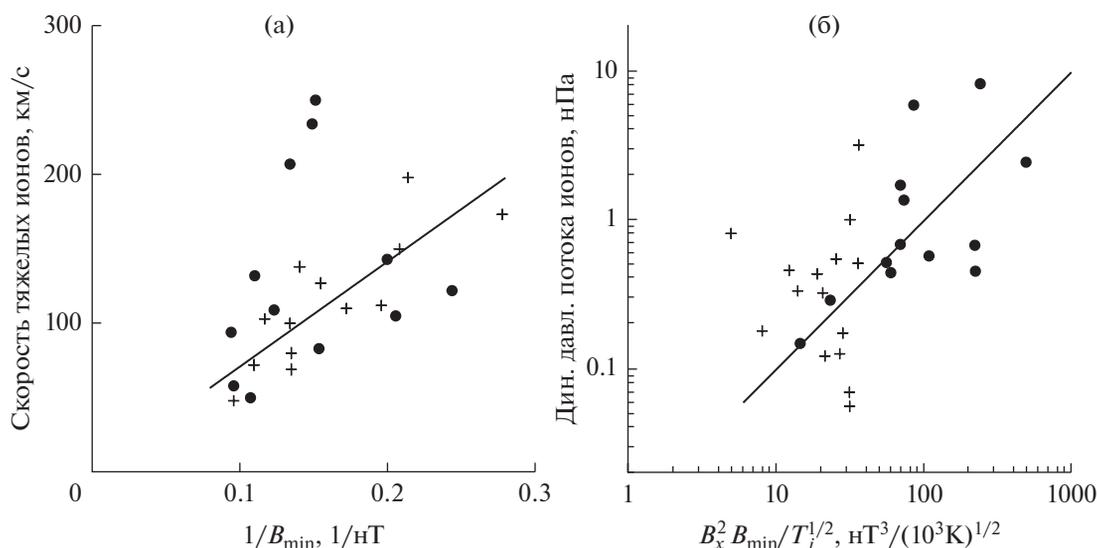


Рис. 9. Корреляционные зависимости для двух процессов ускорения ионов в хвосте магнитосферы Марса: ускорение в поперечном электрическом поле хвоста (а) и ускорение из-за натяжения силовых линий магнитного поля (б).

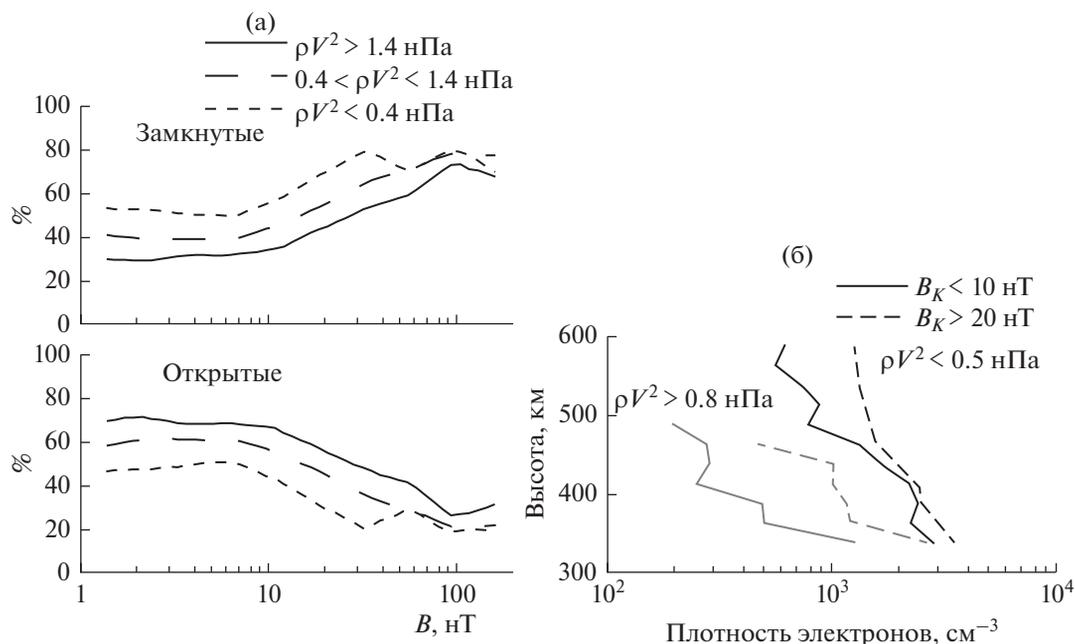
означает, что в этом случае тяжелые ионы плазменного слоя получают энергию за счет поперечного электрического поля, что похоже на ситуацию в Земной магнитосфере, и во взаимодействии солнечного ветра с Марсом преобладает планетарное магнитное поле. На рис. 9б лучше корреляция для точек, и в этом случае тяжелые ионы набирают энергию за счет процесса ускорения, связанного с натяжением силовых линий магнитного поля. Это похоже на ситуацию в магнитосфере Венеры, и в этом случае преобладают эффекты планетарной ионосферы в отклонении солнечного ветра вокруг Марса. Таким образом, переходное давление солнечного ветра  $\rho V^2 \sim 0.6$  нПа разделяет различные преобладающие процессы ускорения ионов кислорода в плазменном слое марсианской магнитосферы.

В 2013 г. к Марсу был запущен американский космический аппарат *MAVEN* (*Mars Atmospheric and Volatile Evolution*), который в 2014 г. вышел на орбиту Марса. На этом аппарате в числе других экспериментов, проводятся оптические измерения в атмосфере, измерения магнитного поля, а также ионов и электронов солнечного ветра.

Используя энергетические и угловые спектры электронов, авторы [47] анализировали топологию силовых линий магнитного поля вблизи Марса при различных динамических давлениях солнечного ветра. Было обнаружено, что в периоды высокого динамического давления, “драпированное” магнитное поле проникает на более низкие высоты на дневной стороне планеты, сжимая замкнутые силовые линии магнитного поля. На ночной стороне планеты существенной зависимости топологии поля от давления солнечного

ветра не обнаружено. На рис. 10а показана доля замкнутых и открытых силовых линий, наблюдавшихся на *MAVEN* на высотах 500–800 км над планетой в дневное время в зависимости от намагниченности коры планеты для трех диапазонов давления набегающего потока солнечного ветра. Рис. 10а, по существу, воспроизводит рис. 3 из работы [47] за исключением того, что здесь объединены случаи наблюдения открытого и “драпированного” магнитного поля, поскольку и та и другая топология поля способствует уходу частиц от планеты (на рис. обозначено “открытые”). На высотах 500–800 км замкнутые силовые линии наблюдаются при низком давлении солнечного ветра с вероятностью более 50% практически над всей подсолнечной областью планеты, независимо от намагниченности коры, а на ночной стороне только в областях максимальной намагниченности коры, т.е. в основном силовые линии вытянуты в хвост. При высоком давлении солнечного ветра и на дневной и на ночной стороне планеты в областях невысокой намагниченности коры Марса преобладает открытая топология магнитного поля. Высокое давление солнечного ветра тем самым приводит к увеличению потока ионов покидающих ионосферу планеты.

По данным космического аппарата *MAVEN* также рассматривалось влияние динамического давления солнечного ветра на верхнюю ионосферу Марса [48]. Авторы показали, что при высоком динамическом давлении солнечного ветра ( $>0.8$  нПа) плотность плазмы в верхней ионосфере ( $>350$  км) резко падает при всех зенитных углах Солнца, независимо от намагниченности коры планеты (рис. 10б), в то время как при  $\rho V^2 < 0.5$  нПа



**Рис. 10.** (а) Доля замкнутых (вверху) и открытых (внизу) силовых линий магнитного поля, наблюдавшаяся по данным космического аппарата *MAVEN* на высотах 500–800 км на дневной стороне в зависимости от намагниченности коры (по наблюдениям *MGS* на высоте  $\sim 400$  км) для трех диапазонов динамического давления солнечного ветра [44]. (б) Сравнение высотных профилей плотности электронов в верхней ионосфере Марса для высокого,  $>0.8$  нПа, (слева) и низкого,  $<0.5$  нПа, (справа) динамических давлений солнечного ветра. Сплошные линии показывают профили в областях низкой намагниченности коры планеты ( $B_K$ ), пунктирные – в областях высокой намагниченности [48].

значительная плотность ионосферных электронов наблюдается на высотах  $>500$  км.

Таким образом, измерения на космическом аппарате *MAVEN* подтверждают наличие переходного динамического давления солнечного ветра  $\sim 0.6$  нПа, обнаруженного ранее по данным *Фобоса-2*.

### ГОРЯЧАЯ КИСЛОРОДНАЯ КОРОНА МАРСА

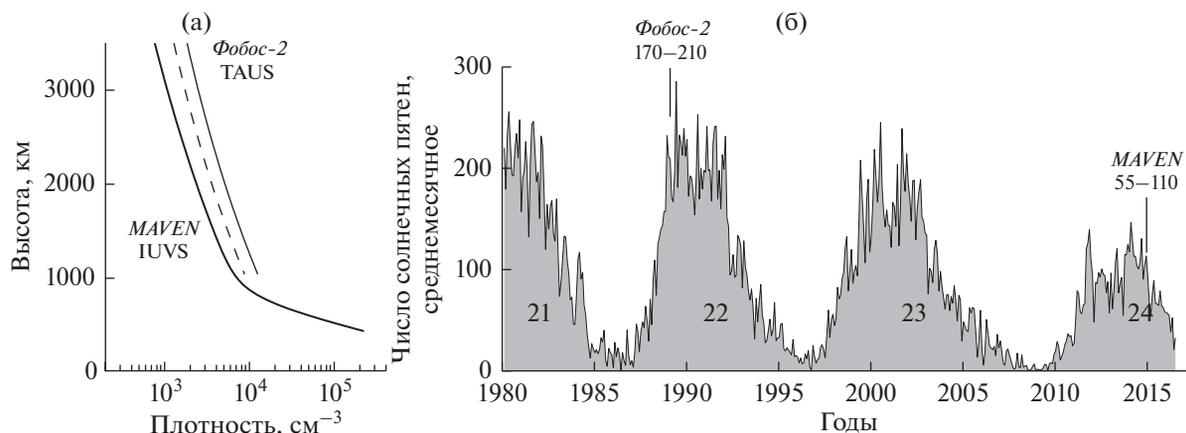
Процесс потери горячего кислорода с Марса хорошо известен уже много десятилетий (см., напр., [49, 50]). Около 64% атомов O, возникающих вблизи экзобазы из-за диссоциативной рекомбинации ионов  $O_2^+$ , обладают достаточной энергией, чтобы преодолеть силу гравитации. Эти атомы и образуют горячую кислородную корону. Характерный размер марсианской горячей кислородной короны составляет несколько миллионов км, и именно на этих расстояниях большая часть кислорода планетарного происхождения ионизируется, и образующиеся ионы  $O^+$  уносятся солнечным ветром [51].

Около 30 лет назад в начале 1989 г. по данным космического аппарата *Фобос-2* было обнаружено, что солнечный ветер существенно тормозится перед околопланетной ударной волной, как в подсолнечной области (рис. 6), так и в области терминатора. Это торможение было объяснено

Веригиным с соавторами [51–53] нагружением солнечного ветра ионами кислорода, образующимися при ионизации атомов кислорода горячей короны Марса. Однако такое объяснение приводило к оценке плотности горячего кислорода в 3–5 раз превосходившей существовавшие в то время модельные расчеты максимальной плотности горячей кислородной короны.

Первые прямые наблюдения атомов O марсианской короны были выполнены в 2014 г. на борту орбитального корабля *MAVEN* в эксперименте IUVS (Фотографирующий ультрафиолетовый спектрограф – Imaging UltraViolet Spectrograph) [54]. На рис. 3 в [54] представлены высотные профили яркости кислорода Марсианской короны. По этим профилям с использованием обратного преобразования Абеля можно рассчитать усредненную концентрацию атомов кислорода горячей короны Марса в зависимости от планетоцентрического расстояния [55]. Этот профиль показан жирной линией на рис. 11. Тонкой линией показан профиль, представляющий верхний предел суммарной взвешенной коронарной плотности кислорода и водорода, оцененный в работе [53] по торможению потока солнечного ветра перед околопланетной ударной волной:

$$n_O(r) + n_H(r) \frac{m_H \tau_O}{m_O \tau_H} \approx \frac{2700}{r^2} \cdot \left( 1 + \frac{15.4}{r^3} \right),$$



**Рис. 11.** Сравнение плотности горячей кислородной короны Марса (а) по данным экспериментов IUVS/MAVEN (полужирная кривая) и TAUS/Фобос-2 (пунктир — плотность кислородной короны, сплошная тонкая линия — суммарная плотность горячего кислорода и водорода), и изменение солнечной активности в период между этими экспериментами (б) [55].

где  $m_H$ ,  $m_O$  и  $\tau_H$ ,  $\tau_O$  — массы и времена ионизации для кислорода и водорода, соответственно. Пунктирной линией на рис. 11 показан предельный профиль плотности кислорода, который составляет примерно 70% суммарной плотности [53]. Видно хорошее согласие кривых плотности кислорода по измерениям на аппарате MAVEN и старым оценкам по данным Фобоса-2. Согласие будет еще лучше, если учесть, что измерения на Фобосе-2 проводились при гораздо более высокой солнечной активности.

Хорошее совпадение результатов наших оценок и прямых измерений свидетельствует о необходимости учета вклада околомарсианской короны при исследовании процессов взаимодействия солнечного ветра с этой планетой.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что в мультипольном моменте планеты Марс существует немаловажная дипольная составляющая. Наряду с выявленными ранее эффектами индукционного магнитного поля в хвосте магнитосферы Марса этот факт свидетельствует об уникальности Марсианского препятствия в потоке солнечного ветра, имеющего свойства Земного магнитного и Венерианского ионосферного препятствий. Из-за изменчивых условий в солнечном ветре в разные периоды измерений то «ионосферный», то «магнитный» компонент преобладает во взаимодействии с планетой.

2. Пересмотрены и объяснены данные по магнитному полю, полученные Долгиновым и др. на спутнике Марс-3. Показано, что Марс-3 наблюдал сильное и регулярное магнитное поле точно над областью наиболее сильной намагниченности марсианской коры в южном полушарии планеты, обнаруженной по данным MGS. Таким об-

разом, Марс-3 зарегистрировал магнитное поле марсианской коры в начале 1972 г., примерно за 25 лет до MGS.

3. Наблюдения на Марсе-3 велись в период низкого динамического давления солнечного ветра, и давления наблюдаемого магнитного поля было достаточно для баланса потока солнечного ветра.

4. Ранее при моделировании границы магнитосферы по данным эксперимента TAUS на космическом аппарате Фобос-2 была получена величина переходного динамического давления солнечного ветра: при низком динамическом давлении  $<0.6$  нПа в процессах взаимодействия солнечного ветра с планетой преобладает влияние остаточной намагниченности коры планеты, в то время как при высоком давлении солнечного ветра  $>0.6$  нПа преобладают эффекты отклонения солнечного ветра ионосферой планеты.

5. Анализ топологии силовых линий магнитного поля вблизи Марса и вариаций плотности электронов в ионосфере планеты по данным космического аппарата MAVEN подтверждает наличие переходного динамического давления солнечного ветра, обнаруженного ранее по данным Фобоса-2. При высоком давлении солнечного ветра открытая топология поля преобладает глубоко в ионосфере, ионосфера Марса становится значительно более подверженной воздействию солнечного ветра и плотность плазмы на высотах  $>350$  км резко падает.

6. В зависимости от динамического давления солнечного ветра механизм ускорения планетных ионов в плазменном слое магнитного хвоста различный. Смена режимов ускорения ионов в плазменном слое происходит при  $\rho V^2 \approx 0.6$  нПа, при том же значении, когда МРв в подсолнечной области начинает удаляться от планеты с уменьшением давления.

7. Измерения плотности горячего кислорода, выполненные на аппарате *MAVEN* в 2014 г. показали, что корона Марса гораздо более плотная, чем полагали по теоретическим оценкам, эти измерения подтвердили оценки плотности горячей короны Марса, сделанные 20 лет назад по эффекту торможения солнечного ветра перед околосианской ударной волной, обнаруженному в эксперименте TAUS на космическом аппарате *Фобос-2*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith E.J., Davis L. Jr., Coleman P.J. Jr., Jones D.E.* Magnetic Field Measurements Near Mars // *Science*. 1965. V. 149. № 3689. P. 1241–1242. <https://doi.org/10.1126/science.149.3689.1241>
2. *Smith E.J.* Planetary magnetic field experiment. In *Advance Space experiments* / Eds. Tiffany O.L. and Zaitzeff E.M. American Astronautic Society, Tarzana, California, 1969.
3. *Michel F. C.* Solar wind interactions with planetary atmospheres // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1971. V. 9. P. 427.
4. *Spreiter J.R., Rizzi A.W.* The Martian bow wave—Theory and observation // *Planet. Space Sci.* 1972. V. 20. P. 205.
5. *Dryer M., Heckman G.R.* Application of the hypersonic analogue to the standing shock of Mars // *Solar Phys.* 1967. V. 2. P. 112.
6. *Vaisberg O.L., Bogdanov A.V., Smirnov V.N., Romanov S.A.* On the nature of the solar-wind-Mars interaction, in: *Physics of Solar Planetary Environment* / Ed. by Williams D.J., AGU, Boulder, 1976. P. 854–871.
7. *Долгинов Ш.Ш., Ерошенко Е.Г., Жужгов Л.Н.* Магнитное поле в ближайшей окрестности Марса по данным спутников *Марс 2* и *3* // Доклады РАН СССР. 1972. Т. 207. № 6. С. 1296–1299.
8. *Dolginov Sh.Sh., Yeroshenko Ye.G., Zhuzgov L.N.* The magnetic field of Mars according to the data from *Mars 3* and *Mars 5* // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. № 19. P. 3353–3362. <https://doi.org/10.1029/JA081i019p03353>
9. *Грингауз К.И., Безруких В.В., Бреус Т.К. и др.* Исследования солнечной плазмы около Марса и на траектории Земля–Марс с помощью ловушек заряженных частиц на советских аппаратах в 1971–1973 гг. 2. Характеристики электронов вдоль орбит искусственных спутников Марса *Марс-2* и *Марс-3* // Космич. исслед. 1974. Т. 12. № 4. С. 585–599.
10. *Russell C.T.* The magnetic field of Mars: *Mars 3* evidence reexamined // *Geophys. Res. Lett.* 1978. V. 5. № 1. P. 81–84.
11. *Russell C.T.* On the relative locations of the bow shocks of the terrestrial planets // *Geophys. Res. Lett.* 1977. № 4. P. 387–390.
12. *Verigin M.I., Kotova G.A., Slavin J.A.* Measurements of the Martian crust magnetization 25 years before its discovery // *The Tenth Moscow Solar System Symposium, 7–11 October 2019*, Space Research Institute, Moscow, 2019. P. 54–57.
13. *Slavin J.A., Holzer R.E.* The solar wind interaction with Mars revisited // *J. Geophys. Res.* 1982. V. 87. № B12. P. 10285–102961.
14. *Lindal G.F., Hotz H.B., Sweetnam D.N. et al.* Viking radio occultation measurements of the atmosphere and topography of Mars: Data acquired during 1 Martian year of tracking // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. № B14. P. 8443–8456. <https://doi.org/10.1029/JB084iB14p08443>
15. *Yeroshenko Y., Riedler W., Schwingenschuh K. et al.* The magnetotail of Mars: Phobos observations // *Geophys. Res. Lett.* 1990. V. 17. № 6. P. 885–888. <https://doi.org/10.1029/g1017i006p00885>
16. *Verigin M.I., Gringauz K.I., Kotova G.A. et al.* The dependence of the Martian magnetopause and bow shock on solar wind ram pressure according to *Phobos-2* TAUS ion spectrometer measurements // *J. Geophys. Res.* 1993. V. 98. P. 1303–1309.
17. *Acuña M.H., Connerney J.E.P., Wasilewski P. et al.* Magnetic field and plasma observations at Mars: initial results of the Mars Global Surveyor mission // *Science*. 1998. V. 279. P. 1676–1680.
18. *Krymskii A.M., Breus T.K., Ness N.F. et al.* Structure of the magnetic field fluxes connected with crustal magnetization and topside ionosphere at Mars // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № A9. P. 1245.
19. *Acuña M.H., Connerney J.E.P., Wasilewski P. et al.* Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 23403–23418. <https://doi.org/10.1029/2000JE001404>
20. *Connerney J.E.P., Acuña M.H., Wasilewski P. et al.* The global magnetic field of Mars and implications for crustal evolution // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28. № 21. P. 4015–4018.
21. *Langlais B., Purucker M.E., Manda M.* Crustal magnetic field of Mars // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2004. V. 109. P. E02008. <https://doi.org/10.1029/2003JE002048>
22. *Langlais B., Thébaud E., Houliéz A. et al.* A New Model of the Crustal Magnetic Field of Mars Using *MGS* and *MAVEN* // *J. Geophys. Res. Planets*. 2019. V. 124. P. 1542–1569. <https://doi.org/10.1029/2018JE005854>
23. *Gao J., Rong Z., Li X. et al.* A spherical harmonic Martian crustal magnetic field model that combines *MAVEN* and *MGS* data. Preprint. *Earth and Space Science Open Archive*. 2021. <https://doi.org/10.1002/essoar.10505531.1>
24. *Breus T.K., Krymskii A.M., Lundin R. et al.* The solar wind interaction with Mars: Consideration of *Phobos-2* mission observations of an ion composition boundary on the dayside // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. P. 11165–11174. <https://doi.org/10.1029/91JA01131>
25. *Krymskii A.M., Breus T.R., Ness N.F. et al.* Effect of crustal magnetic fields on near terminator ionosphere at Mars: Comparison of in situ magnetic field measurements with data of radio science experiments on board *Mars Global Surveyor* // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № A12. P. 1431. <https://doi.org/10.1029/2002JA009662>
26. *Arkani-Hamed J.* A 50-degree spherical harmonic model of the magnetic field of Mars // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 197–208. <https://doi.org/10.1029/2000JE001365>

27. Cloutier P.A., Law C.C., Crider D.H. et al. Venus-like interaction of the solar wind with Mars // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 26. № 17. P. 2685–2688.
28. Vignes D., Mazelle C., Rueme H. et al. The solar wind interaction with Mars: locations and shapes of the bow shock and the magnetic pile-up boundary from the observations of the MAG/ER experiment onboard *Mars Global Surveyor* // *Geophys. Res. Lett.* 2000. V. 27. № 1. P. 49–52.
29. Dubinin E., Sauer K., Lundin R. et al. Plasma characteristics of the boundary layer in the Martian magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. № A12. P. 27061–27065.
30. Rosenbauer H., Shutte N., Apathy I. et al. Ions of Martian origin and plasma sheet in the Martian magnetosphere: Initial results of the TAUS experiment // *Nature*. 1989. V. 341. P. 612–614. <https://doi.org/10.1038/341612a0>
31. Nagy A.F., Winterholter D., Sauer K. et al. The plasma environment of Mars // *Space Sci. Rev.* 2003. V. 111. № 1–2. P. 33–114. <https://doi.org/10.1023/B:SPAC.0000032718.47512.92>
32. Crider D.H., Acuña M.H., Connerney J.E.P. et al. Observations of the latitude dependence of the location of the Martian magnetic pileup boundary // *Geoph. Res. Letters*. 2001. V. 29. № 8. P. 11-1–11-4. <https://doi.org/10.1029/2001GL013860>
33. Verigin M., Vignes D., Crider D. et al. Martian obstacle and bow shock: origins of boundaries anisotropy // *Advances in Space Research*. 2004. V. 33. P. 2222–2227.
34. Verigin M.I., Kotova G.A., Remizov A.P. et al. Evidence of the influence of equatorial Martian crustal magnetization on the position of the planetary magnetotail boundary by *Phobos-2* data // *Adv. Space. Res.* V. 28. № 6. P. 885–889. 2001.
35. Розенбауэр Х., Шютте Н., Анати И. и др. Первые результаты измерений ионов марсианского происхождения и обнаружение плазменного слоя в магнитосфере Марса по данным эксперимента ТАУС на КА *Фобос-2* // Письма в *Астроном. журн.* 1990. Т. 16. № 4. С. 368–377.
36. Shutte N.M., Kiraly P., Cravens T.E. et al. Observations of electron and ion fluxes in the vicinity of Mars with the HARP spectrometer // *Nature*. 1989. V. 341. P. 614–616. <https://doi.org/10.1038/341614a0>
37. Gringauz K.I., Breus T.K., Verigin M.I. et al. The magnetosphere plasma boundary at various latitudes according to *Prognoz-3* and *Mars-5* data. Academy of Sciences of the USSR. Space Research Institute. 1978. Preprint Д-263.
38. Lundin R., Zakharov A., Pellinen R. et al. First measurements of the ionospheric plasma escape from Mars // *Nature*. 1989. V. 341. P. 609–612. <https://doi.org/10.1038/341609a0>
39. Verigin M., Kotova G., Shutte N. et al. Quantitative model of the Martian magnetopause shape and its variation with the solar wind Ram pressure based on *Phobos 2* observations // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № 2. P. 2147–2155.
40. Spreiter J.R., Summers A.L., Alksne A.Y. Hydromagnetic flow around the magnetosphere // *Planet. Space Sci.* 1966. V. 14. P. 223–253.
41. Веригин М.И., Котова Г.А., Ремизов А.П. и др. Форма и положение околопланетных ударных волн // *Космич. исслед.* 1999. Т. 37. № 1. С. 38–43. (*Cosmic Research*. P. 34–39.)
42. Riedler W., Möhlmann D., Oraevsky V. et al. Magnetic fields near Mars: first results // *Nature*. 1989. V. 341. P. 604–607. <https://doi.org/10.1038/341604a0>
43. Kotova G.A., Verigin M.I., Remizov A.P. et al. Heavy ions in the magnetosphere of Mars: *Phobos 2*/TAUS observations // *Physics and Chemistry of the Earth*. 2000. V. 25. № 1–2. P. 157–160. [https://doi.org/10.1016/S1464-1917\(99\)00060-4](https://doi.org/10.1016/S1464-1917(99)00060-4)
44. Speiser T.W. Particle trajectories in model current sheets. I. Analytical solutions // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. P. 4219–4226. <https://doi.org/10.1029/JZ070i017p04219>
45. Шабанский В.П. Явления в околоземном пространстве. М.: Наука, 1972.
46. Ip W.-H. Ion acceleration at the current sheet of the Martian magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19. P. 2095–2098. <https://doi.org/10.1029/92GL02098>
47. Weber T., Brain D., Mitchell D. et al. The influence of solar wind pressure on Martian crustal magnetic field topology // *Geophys. Res. Letters*. 2019. V. 46. P. 2347–2354. <https://doi.org/10.1029/2019GL081913>
48. Girazian Z., Halekas J.S., Morgan D.D. et al. The effects of solar wind dynamic pressure on the structure of the topside ionosphere of Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2019. V. 46. P. 8652–8662. <https://doi.org/10.1029/2019GL083643>
49. McElroy M.B. Mars: An evolving atmosphere // *Science*. 1972. V. 175. P. 433–435.
50. Krasnopolsky V.A. in *Photochemistry of the atmospheres of Mars and Venus* / Ed. von Zahn U. N.Y. Springer-Verlag. 1986.
51. Verigin M.I., Gringauz K.I., Kotova G.A. et al. On the problem of the Martian atmosphere dissipation: *Phobos 2* TAUS spectrometer results // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96. № A11. P. 19315–19320.
52. Котова Г., Веригин М., Ремизов А. и др. Торможение солнечного ветра перед отошедшей ударной волной около Марса – возможное следствие плотной короны нейтрального газа // *Космич. исслед.* 1996. Т. 34. №6. С. 604–612. (*Cosmic Research*. P. 559–566.)
53. Kotova G., Verigin M., Remizov A. et al. Study of the solar wind deceleration upstream of the Martian terminator bow shock // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № A2. P. 2165–2173.
54. Deighan J., Chaffin M.S., Chaufray J.-Y. et al. MAVEN IUVS observation of the hot oxygen corona at Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 9009–9014.
55. Verigin M.I., Kotova G.A. Oxygen loss from Mars: Earlier *PHOBOS 2*, recent *MAVEN* observations, and how to measure oxygen loss by in-situ ion measurements. The Seventh Moscow Solar System Symposium, 10–14 October 2016, Space Research Institute, Moscow, 2016. P. 5ab–7ab.

УДК 523.43–1/–8

## НАБЛЮДЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ МЕЖДУ ИОНОСФЕРОЙ И ОБТЕКАЮЩИМ ПОТОКОМ НА ДНЕВНОЙ СТОРОНЕ МАРСА

© 2021 г. К. И. Ким<sup>1</sup>, \*, С. Д. Шувалов<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

\*kimki@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 20.02.2021 г.

После доработки 09.04.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Взаимодействие солнечного ветра с плазменной оболочкой планет без собственного глобального магнитного поля имеет иной характер в отличие от аналогичного процесса у Земли за счет более близкого расположения головной ударной волны к поверхности планеты. Схожие процессы и структуры при взаимодействии солнечного ветра с плазменной оболочкой планеты можно обнаружить как у планет с глобальным магнитным полем, так и без. В данной работе проводится анализ наблюдений плазменных структур, обнаруженных в переходной области между ионосферой и обтекающим потоком, более известной как область индуцированной магнитосферы, на дневной стороне Марса по данным измерений комплекса приборов по изучению характеристик частиц и полей космического аппарата *Mars Atmosphere and Volatile EvolutioN (MAVEN)*. Вычислена скорость наблюдаемых плазменных структур из предположения, что она совпадает со скоростью де Хоффманна–Теллера путем минимизации электрического поля в подвижной системе координат. Проверена гипотеза происхождения данных структур в процессе формирования вихрей неустойчивости Кельвина–Гельмгольца с помощью анализа направления движения ионов  $H^+$ ,  $O^+$  и  $O_2^+$  в разных системах координат. Проведен анализ диаграмм рассеяния проекций скоростей в зависимости от концентрации выбранной ионной компоненты плазмы. Исходя из результатов анализа, показывается, что не все критерии детектирования выполнимы в случае процесса формирования вихрей неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на Марсе.

DOI: 10.31857/S0023420621060030

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс взаимодействия солнечного ветра с плазменными оболочками планет, как Марс и Венера, отличается от аналогичного процесса у Земли. Земля обладает собственным глобальным магнитным полем, которое создает барьер на пути солнечного ветра — магнитосферу. Так как поток солнечного ветра является сверхзвуковым, то при взаимодействии с магнитосферой формируется головная ударная волна, которая тормозит и нагревает поток солнечного ветра [1]. Замедленный и нагретый солнечный ветер обтекает магнитосферу, формируя обтекающий поток. Также, так как магнитное поле вморожено в солнечный ветер, силовые линии магнитного поля огибают магнитосферу планеты в той же области — обтекающем потоке. В отличие от Земли, Марс не обладает собственным глобальным магнитным полем [2], поэтому солнечный ветер взаимодействует не с магнитосферой, а с атмосферой. Предполагается, что формируется некоторый слой над атмосферой Марса, являющийся барьером на пути распространения солнечного ветра — индуциро-

ванная магнитосфера [3], с формированием головной ударной волны. При этом расстояние, на котором располагается головная ударная волна у Марса [4], значительно меньше, чем у Земли.

Солнечный ветер почти напрямую взаимодействует с ионизованным верхним слоем атмосферы Марса и это приводит к ее потере. Различают разные механизмы и каналы атмосферных потерь [5], одним из таких механизмов является образование плазменных неустойчивостей. Известно, что область обтекающего потока является источником низкочастотных волн, областью формирования плазменных структур и неустойчивостей, например, ионно-циклотронных волн, ультранизкочастотных волн в обтекающем потоке, плазменных облаков [6] и неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [7].

Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца является неустойчивостью, формирующейся при взаимодействии двух встречных потоков жидкостей [8]. В плазме данная неустойчивость рассматривается в приближении магнитной гидродинамики, когда отношение теплового давления к маг-

нитному давлению  $\beta \ll 1$ . В таком случае, плазму можно рассматривать в приближении проводящей жидкости. Отличительным признаком неустойчивости Кельвина–Гельмгольца является формирование вихря, в котором происходит перемешивание двух взаимодействующих жидкостей. У Марса формирование вихря усложняется тем, что взаимодействие происходит между столкновительной ионизованной частью атмосферы – ионосферы – и бесстолкновительной плазмой солнечного ветра. Процессы переноса массы, тепла и энергии в вихрях могут играть существенную роль в атмосферных потерях на Марсе [9], Венере и планетах, у которых отсутствует собственное глобальное магнитное поле.

В данной работе проводится анализ наблюдений плазменных структур, ассоциируемых с вихрями неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, в области между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса. Исследование проводится с помощью данных комплекса приборов по изучению характеристик и динамики частиц и полей космического аппарата *MAVEN*. На основе полученных данных проводится проверка ряда критериев формирования вихрей неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и оценивается размер структуры вдоль траектории космического аппарата.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИБОРЫ

Космический аппарат *MAVEN* был запущен 18.XI.2013, вышел на орбиту Марса 22.IX.2014. Основные решаемые научные задачи включают в себя: изучение процессов, приводящих к потере Марсом атмосферы и процесса взаимодействия солнечного ветра с плазменной оболочкой Марса. Космический аппарат имеет эллиптическую орбиту с высотой перигентра 150 км и высотой апоцентра 6200 км со средним периодом обращения 4.5 ч. В наших исследованиях мы используем измерения ионного анализатора *STATIC* [10], анализатора электронов солнечного ветра *SWEA* [11] и магнитометра (*MAG*) [12] из комплекса по изучению характеристик и динамики частиц и полей *MAVEN*.

Ионный анализатор *STATIC* является прибором с тороидальным электростатическим анализатором и времяпролетной секцией. Поле зрения прибора *STATIC* составляет  $360^\circ$  по азимутальному и  $90^\circ$  по полярному углу с угловым разрешением  $22.5^\circ$  и  $22.5^\circ$  по азимутальному и полярному углу соответственно. Кроме того, поле зрения прибора при необходимости может быть уменьшено путем подачи дополнительного потенциала на дефлекторы. Диапазон измеряемых энергий ионов составляет от 0.1 эВ до 30 кэВ с энергетическим разрешением 15%, которое охватывает энергии экзосферных и атмосферных ионов. Прибор

*STATIC* способен измерять массы ионов в диапазоне от 1 до 70 а. е. м. с массовым разрешением, равным 4, в том числе ионы  $\text{H}^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}_2^+$  и  $\text{CO}_2^+$ .

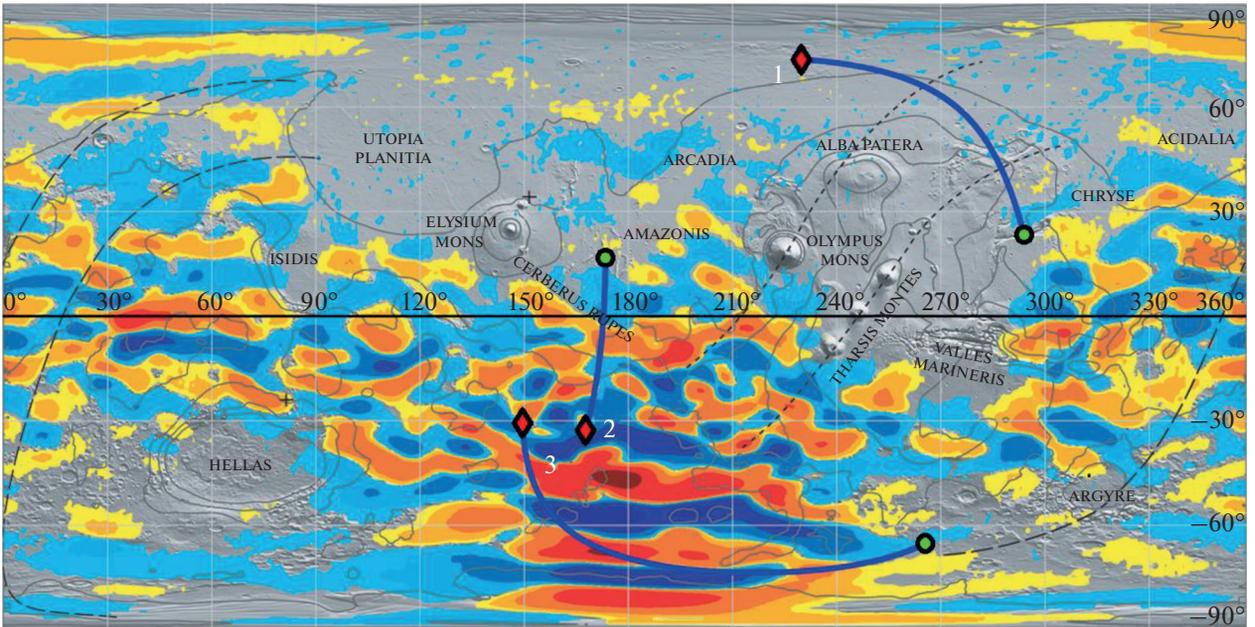
Анализатор электронов солнечного ветра *SWEA* является прибором с электростатическим анализатором. Прибор также имеет дефлекторы, контролирующие поле зрения. Поле зрения прибора *SWEA* составляет  $360^\circ$  по азимутальному и  $120^\circ$  по полярному углу с угловым разрешением  $22.5^\circ$  и  $20^\circ$  по азимутальному и полярному углу соответственно. Диапазон измеряемых энергий электронов составляет от 5 эВ до 4.6 кэВ с разрешением 17% энергии.

Магнитометр *MAG* это датчик, который измеряет три компоненты магнитного поля с частотой 32 Гц. Измерения охватывают значения магнитного поля в невозмущенном солнечном ветре, области индуцированной магнитосферы и аномалиях магнитного поля в южном полушарии Марса.

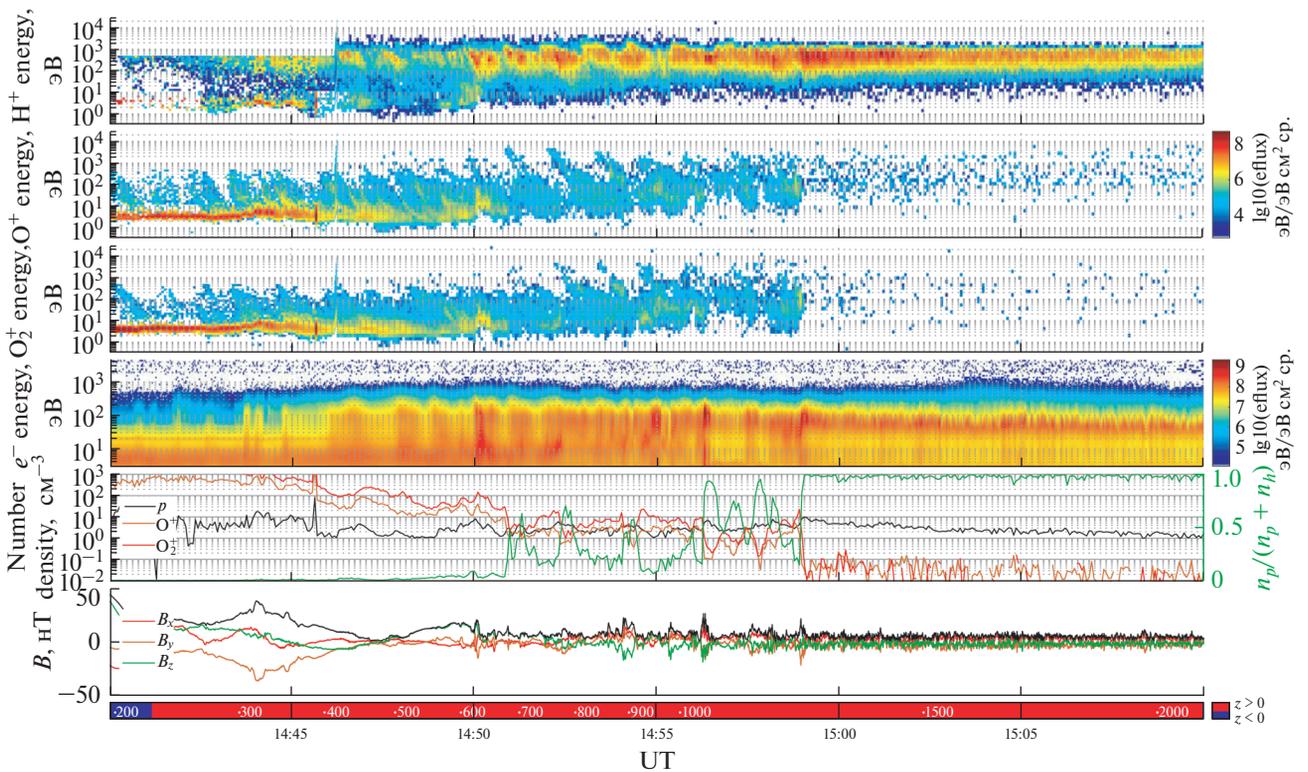
В совокупности, одновременное использование данных приборов позволяет изучать энерго-масс-угловые функции распределения ионов солнечного ветра, марсианской экзосферы и атмосферы, энерго-угловые функции распределения электронов солнечного ветра и атмосферы, конфигурацию межпланетного магнитного поля, обтекающего потока, хвоста и магнитных аномалий.

## НАБЛЮДЕНИЕ

Выбрано несколько пролетов с пересечениями области между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса с большими солнечно-зенитными углами без влияния магнитных аномалий (рис. 1). На рис. 2 показано наиболее интересное пересечение. В промежутке времени между 14.41 и 15.01 UT 5.XI.2017 обнаружена сильно возмущенная область с нагретыми ионами  $\text{O}^+$  и  $\text{O}_2^+$ , вытянутые из ионосферы в обтекающий поток. Ионосфера, наблюдаемая с 14.41 по 14.45 UT, характеризуется высоким дифференциальным потоком энергии тяжелых ионов  $\text{O}^+$  и  $\text{O}_2^+$ , относительно спокойным магнитным полем и наличием низкоэнергичных электронов. Наблюдаемая область в интервале времени с 14.59 до 15.01 UT является обтекающим потоком и характеризуется наличием сильно осциллирующего магнитного поля, высоким дифференциальным потоком энергии и широким энергетическим спектром легких ионов  $\text{H}^+$ . Траектория космического аппарата показывает, что начало наблюдений соответствует ионосфере, продолжается в возмущенной области и заканчивается в области обтекающего потока. Видно, что в интервале времени от 14.45 до 14.59 UT в области между ионосферой и обтекающим потоком наблюдаются периодические плазменные структуры, состоящие преимущественно из тяжелых ионов  $\text{O}^+$  и  $\text{O}_2^+$ . Диапазон



**Рис. 1.** Проекция траекторий космического аппарата *MAVEN* на поверхность Марса, в которых наблюдались похожие плазменные структуры. Круг означает начало измерений, ромб – конец. Цифрами указаны: 1) наблюдение, анализируемое с текущей работе, 2) наблюдение вихрей неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [7], 3) наблюдение плазменных облаков [6]. Видно, что область наблюдений текущей работы находится вне зоны магнитных аномалий на южном полушарии Марса.



**Рис. 2.** Наблюдение плазменных структур 5.XI.2017 в интервале времени от 14.40 до 15.10 UT. Сверху вниз: диаграмма энергия–время для ионов  $H^+$ ,  $O^+$ ,  $O_2^+$  и  $e^-$ , на шкале справа выделен дифференциальный поток энергии [ $\text{эВ эВ}^{-1} \text{с}^{-1} \text{рад}^{-1} \text{см}^{-2}$ ]; концентрация [ $\text{см}^{-3}$ ] ионов  $H^+$ ,  $O^+$  и  $O_2^+$ ; три компоненты магнитного поля [нТ] в MSO.

энергий тяжелых ионов в данных структурах варьируется от нескольких эВ до кэВ на временном масштабе одной минуты. Наблюдаемые колебания отношения концентрации легких ионов к суммарной концентрации тяжелых ионов  $n_{H^+}/(n_{O^+} + n_{O_2^+})$  наиболее ярко выражены в промежутке времен с 14.51 до 14.59 UT. Также наблюдаются периодические вариации энергетического спектра легких ионов  $H^+$  с примерно тем же периодом, что и масштаб вариаций энергетического спектра тяжелых ионов.

Чтобы сопоставить наблюдение с некоторым физическим процессом в наблюдаемой области, необходимо ответить на следующие вопросы:

– какие физические условия и процессы приводят к формированию данных плазменных структур?

– каков источник тяжелых ионов  $O^+$  и  $O_2^+$ ?

– каков механизм ускорения тяжелых ионов  $O^+$  и  $O_2^+$  до скоростей, сопоставимых со скоростями обтекающего потока?

– каковы пространственные масштабы структуры?

### АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЯ

Похожие плазменные структуры уже наблюдались в других работах, посвященных изучению плазменных структур и неустойчивостей в плазменной оболочке Марса [6, 7], однако эти измерения были проведены в областях с магнитными аномалиями. Области магнитных аномалий, находящиеся в южном полушарии Марса, создают локальную магнитосферу, которая влияет на динамику окружающей плазмы [13]. К тому же известно, что плазма в обтекающем потоке на больших солнечно-зенитных углах неустойчива [14], что приводит к формированию различных структур, в том числе вихрей неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Плазма обтекающего потока, состоящая из ионов солнечного ветра (95%  $H^+$  и 5%  $He^+$ ), проникает внутрь ионосферы, взаимодействуя с ионосферными ионами  $O^+$  и  $O_2^+$ . Ускоренные ионосферные ионы  $O^+$  и  $O_2^+$  под действием центробежной силы вытягиваются из ионосферы в обтекающий поток, формируя вихрь. Возможными критериями детектирования развитых вихрей Кельвина–Гельмгольца на Марсе являются [6]:

– ионы обтекающего потока, относящиеся к верхней части вихря, имеют скорость выше средней скорости ионов обтекающего потока и двигаются по направлению от Солнца;

– ионы обтекающего потока, относящиеся к нижней части вихря, имеют скорость ниже сред-

ней скорости ионов обтекающего потока и двигаются по направлению к Солнцу;

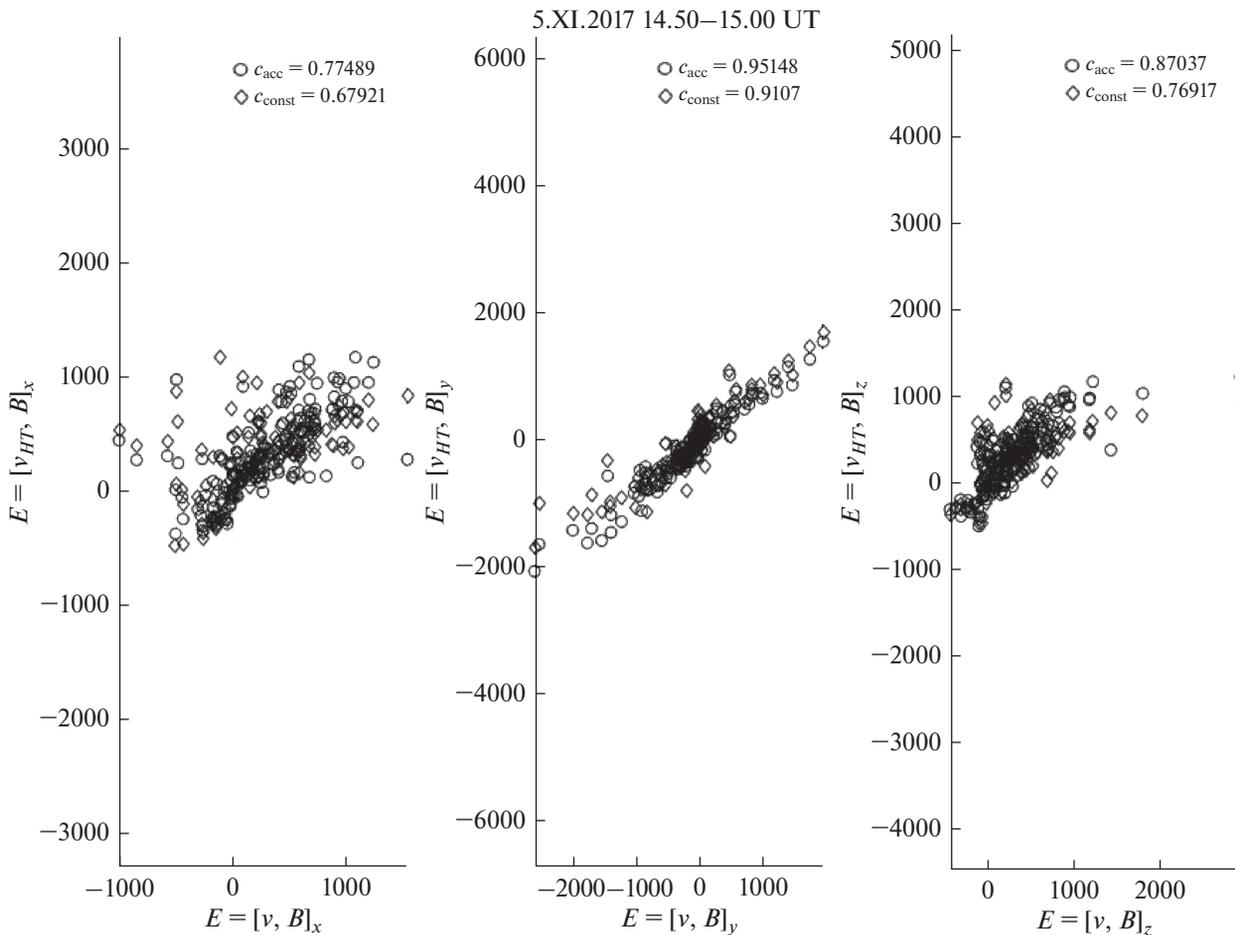
– ионы ионосферы имеют скорость выше тепловой скорости ионов в ионосфере и двигаются по направлению от Солнца со скоростью выше начальной.

Данные критерии согласуются с процессом формирования вихря неустойчивости Кельвина–Гельмгольца в магнитогидродинамическом приближении, когда два потока плазмы за счет разницы скоростей и вязкости начинают вращаться вокруг общего центра масс под действием центробежных сил. В работе предполагается, что наблюдаемые плазменные структуры есть вихри неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и дальнейшие процедуры будут направлены на проверку данного утверждения.

В первую очередь нас интересует скорость центра масс наблюдаемых плазменных структур. Существует несколько подходов к определению данного параметра: через вычисление среднего значения между скоростью ионов обтекающего потока и ионосферных ионов [15] и через вычисление скорости системы координат де Хоффманна–Теллера [16]. В данной работе используется второй подход, который позволяет переводить динамические структуры в статические структуры. В системе координат де Хоффманна–Теллера по определению электрическое поле минимально, соответственно, чтобы найти скорость данной системы координат необходимо найти минимум следующего функционала (1):

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\mathbf{v}^{(i)} - \mathbf{V}) \times \mathbf{B}^{(i)} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\mathbf{v}^{(i)}, \mathbf{B}^{(i)}$  – измеренные в системе координат MSO три компоненты скорости ионов  $H^+$  обтекающего потока [км/с] и три компоненты магнитного поля [нТ] в  $i$ -й момент времени. Выбор ионов  $H^+$  в качестве основных носителей электрического поля связан с вопросом роли электрического поля солнечного ветра с ускорением тяжелых ионосферных ионов. Минимум значения функционала (1) по определению дает значение скорости  $\mathbf{V} = \mathbf{V}_{dHT}$  системы координат де Хоффманна–Теллера, и для упомянутых наблюдений эта скорость составляет около 120 км/с в приближении равномерного движения. На рис. 3 представлено сравнение значений электрического поля, определенного как  $-\mathbf{V}_{dHT} \times \mathbf{B}$ , и электрического поля в солнечном ветре. Коэффициенты корреляции для каждой проекции электрического поля составляет  $c_{x, \text{const}} = 0.68$ ,  $c_{y, \text{const}} = 0.91$ ,  $c_{z, \text{const}} = 0.77$ . Таким образом можно сделать вывод, что скорость центра масс, с которой наблюдаемые плазменные структуры пролетают мимо космического аппарата, составляет 120 км/с. Вы-



**Рис. 3.** Диаграмма рассеяния электрического поля, вычисленного через скорость де Хоффманна–Теллера, относительно вычисленного в солнечном ветре электрического поля. Ромбом выделены точки для модели равномерного движения структуры, кругом – для модели ускоренного движения структуры.

численная скорость превышает тепловую скорость ионосферных ионов  $O^+$  и  $O_2^+$ , составляющую при одинаковой температуре  $\sim 2$  и  $4$  км/с соответственно, и скорость космического аппарата, которая составляет для выбранного интервала времени около  $5$  км/с, но меньше скорости обтекающего потока ( $\sim 200$  км/с), что согласуется с первым подходом. Зная скорость и время наблюдения плазменных структур, возможна оценка размера структуры вдоль направления регистрации. Так как период регистрации плазменных структур составляет  $1$  мин, то оцениваемый размер структуры вдоль направления регистрации составляет около  $7200$  км или  $2.1 R_M$  (радиус Марса  $R_M = 3390$  км). Полученный результат не соответствует физическим представлениям о развитии плазменных неустойчивостей и структур. Соответственно, можно сделать вывод, что время вариации скорости наблюдаемых структур намного меньше масштаба времени измерений. Это означает, что наблюдаемая структура движется с ускорением. Вычисление минимума функциона-

ла (1) с помощью двухпараметрической модели (2) позволяет учесть эффект ускоренного движения структуры:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \mathbf{a}_0 t, \quad (2)$$

где  $\mathbf{V}_0$  – начальная скорость [км/с],  $\mathbf{a}_0$  – начальное ускорение [км/с<sup>2</sup>]. Значения начальной скорости и начального ускорения, соответствующих минимуму функционала (1), равны  $\mathbf{V}_0 = (-35.73, -36.61, 28.94)$  и  $\mathbf{a}_0 = (-0.16, 0.13, 0.20)$  соответственно. Коэффициенты корреляции для каждой проекции скорости составляет  $c_{x,acc} = 0.78$ ,  $c_{y,acc} = 0.95$ ,  $c_{z,acc} = 0.87$ , что очевидно лучше, чем для приближения равномерной скорости движения структуры. При этом вычисленные размеры структуры составляют  $3763$  км или  $1.1 R_M$ .

Направление скоростей ионов обтекающего потока и ионосферы играет одну из ключевых ролей в идентификации того, что мы действительно наблюдаем вихри неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. На рис. 4 изображены проекции скоростей ионов  $H^+$ ,  $O^+$  и  $O_2^+$  в системе координат

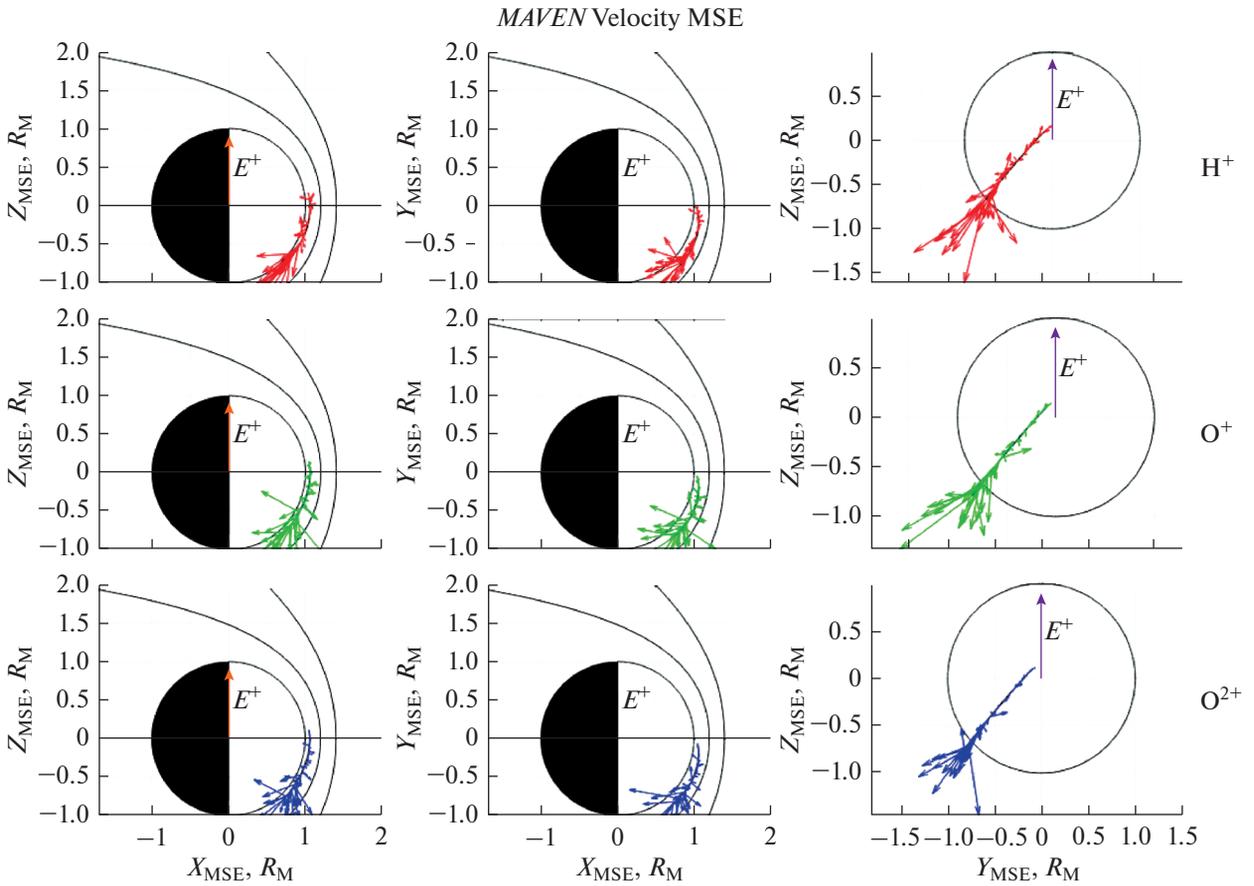


Рис. 4. Проекция скоростей ионов в системе координат MSE. Сверху вниз изображены ионы  $H^+$ ,  $O^+$  и  $O_2^+$ .

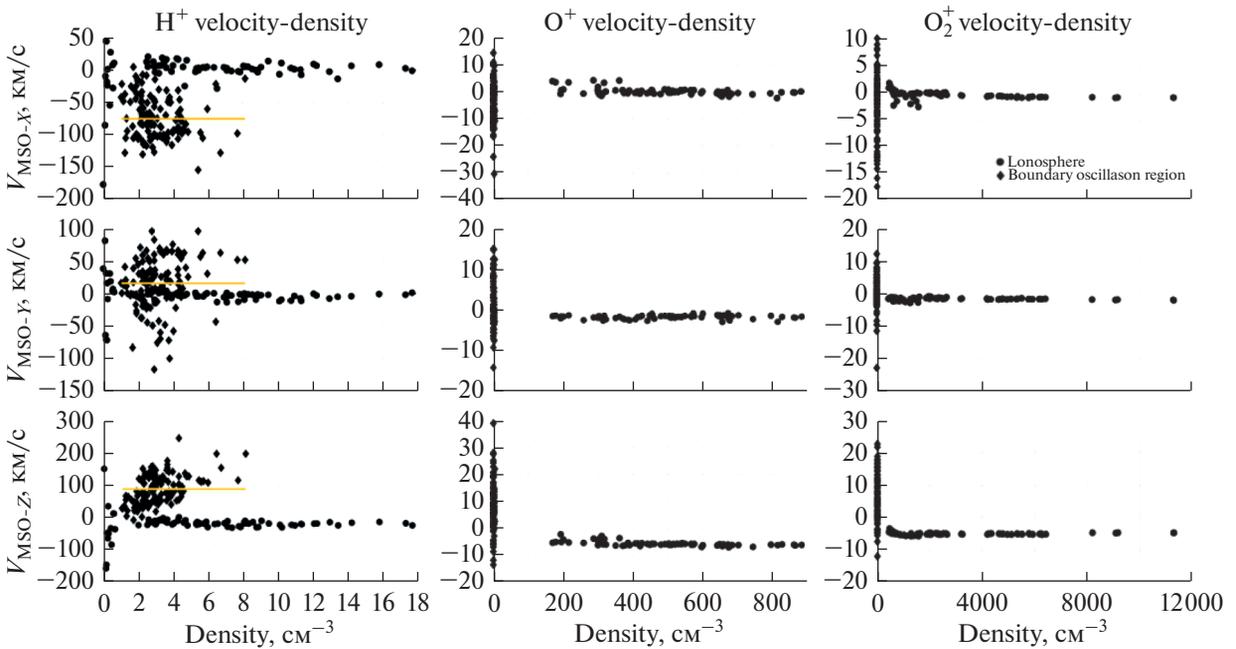


Рис. 5. Диаграмма рассеяния проекции скорости ионов  $H^+$ ,  $O^+$  и  $O_2^+$  относительно концентрации для наблюдения от 5.XI.2017 14.40–15.10 UT.

Марс—Солнце—Электрическое поле (MSE) для выбранного момента времени. Система координат MSE построена таким образом, что ось  $Ox$  направлена на Солнце, ось  $Oz$  направлена вдоль направления электрического поля в солнечном ветре, а ось  $Oy$  дополняет базис до правой тройки. В выбранный интервал времени траектория космического аппарата такова, что он не регистрирует солнечный ветер, однако направление электрического поля в солнечном ветре можно с некоторой точностью вычислить в обтекающем потоке [17]. В такой системе координат величина скоростей ионов не изменится, однако направление скоростей будет указывать на его связь с направлением электрического поля. Отсюда можно сделать вывод о том, насколько электрическое поле связано с ускорением тяжелых ионов до скоростей сопоставимых со скоростями ионов обтекающего потока. Из орбиты видно, что источником тяжелых ионов  $O^+$  и  $O_2^+$  в возмущенной области является ионосфера. Также видно, что направления скоростей ионов  $H^+$ ,  $O^+$  и  $O_2^+$  в редких случаях имеют положительную  $z$ -компоненту. Это означает, что электрическое поле солнечного ветра в процессе ускорения тяжелых ионов играет минимальную роль и за ускорение тяжелых ионов ответственен другой механизм. Также стоит отметить наличие тяжелых ионов с направлениями скоростей по направлению к Солнцу, что можно интерпретировать как нижнюю часть вихря, относящуюся к ионосферным ионам. В направлении движения легких ионов преобладает направление против Солнца.

Еще одним способом доказать, что наблюдаемая плазменная структура есть вихрь неустойчивости Кельвина—Гельмгольца, является диаграмма рассеяния проекции скорости—концентрация [18]. В оригинальной статье интервал наблюдений разбивается на область магнитосферы и обтекающего потока, однако у Марса отсутствует магнитосфера, поэтому интервал наблюдений разбивается на область наблюдений ионосферы и возмущенной области. В каждой области для каждой ионной компоненты рассматриваемой структуры строится диаграмма рассеяния проекции скорости относительно концентрации выбранной компоненты. Затем вычисляется средняя скорость в каждой проекции скорости, относительно которой сравнивается распределение ионов в каждой области. В то время как в ионосфере средняя скорость равняется нулю с ненулевыми отклонениями, связанной с тепловым движением ионов, в обтекающем потоке средняя величина проекции скорости отлична от нуля. Ожидается, что распределение относительно среднего значения будет симметричным в силу равномерности распределения по скоростям, однако в случае вихря неустойчивости Кельвина—

Гельмгольца наблюдается перевес в сторону увеличения скорости, который связан с формированием вихря. Как видно из рис. 4 распределение симметричное, что говорит не в пользу гипотезы детектирования вихря неустойчивости Кельвина—Гельмгольца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе наблюдаемые в переходной области между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса плазменные структуры ассоциируются с вихрями неустойчивости Кельвина—Гельмгольца. Основные критерии связанные с направлением движения ионов  $H^+$ ,  $O^+$  и  $O_2^+$  частично соответствуют наблюдениям.

Промежуточный анализ показал, что наблюдаемые плазменные структуры в выбранный момент времени двигаются с ускорением от 60 до 220 км/с. С учетом того, что период наблюдений составляет 1 мин, то оцениваемые размеры наблюдаемых плазменных структур соответствуют  $1.1 R_M$ .

Также в данных плазменных структурах наблюдается часть тяжелых ионов, ускоренных до скоростей обтекающего потока. Механизм ускорения на данный момент не известен, однако выяснено, что электрическое поле солнечного ветра в процессе ускорения на временном масштабе 1 мин играет минимальную роль. Возможным объяснением наличия в наблюдаемой области ионов  $O^+$  и  $O_2^+$  со скоростями, эквивалентными скоростям обтекающего потока, является процесс захвата ионами  $H^+$  обтекающего потока ионосферных ионов, вытесненных из ионосферы в процессе формирования вихря Кельвина—Гельмгольца.

Неполное удовлетворение критериям можно объяснить особенностью траектории спутника, который движется не по касательной к предполагаемой области формирования вихрей и особенностью поля зрения ионного спектрометра STATIC. В добавок траектория спутника в конкретном наблюдении не позволяет оценить характеристики солнечного ветра. В дальнейшем исследовании возможно использовать данные космического аппарата *Mars Express (MEX)*, имеющего ионный спектрометр плазменного комплекса ASPERA-3, который в некоторые интересующие нас моменты времени может находиться в солнечном ветре. Таким образом возможно вычислить моменты функции распределения ионов солнечного ветра, например, скорость, температуру и концентрацию. Однако, к сожалению, у *MEX* отсутствует магнитометр, что делает затрудненным изучение распространяющихся в межпланетном пространстве возмущений и магнитных структур, которые потенциально могут быть источниками плазменных структур в наблюдаемой области у Марса.

Авторы статьи выражают благодарность Российскому научному фонду (РНФ). Работа выполнена в рамках гранта РНФ 21-42-04404 “Венера и Марс в потоке солнечного ветра. Сравнительное исследование.”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wolfe J.H., Intriligator D.S.* The solar wind interaction with the geomagnetic field // *Space Science Review*. 1970. V. 10. P. 511–596.
2. *Acuna M.H.* The magnetic field of Mars // *Leading edge*. 2003. V. 22. P. 769–771.
3. *Halekas J.S., Brain D.A., Luhmann et al.* Flows, fields, and forces in the Mars-solar wind interaction // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. № 11. P. 320–341. <https://doi.org/10.1002/2017JA024772>
4. *Trotignon J.G., Mazelle C., Bertucci C., Acuña M.H.* Martian shock and magnetic pile-up boundary positions and shapes determined from the *Phobos 2* and *Mars Global Surveyor* data sets // *Planetary and Space Science*. 2006. V. 54. № 4. P. 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.01.003>
5. *Ramstad R., Barabash S., Futaana Y. et al.* Ion escape from Mars through time: An extrapolation of atmospheric loss based on 10 years of Mars Express measurements // *J. Geophys. Res. Planets*. 2018. V. 123. P. 3051–3060. <https://doi.org/10.1029/2018JE005727>
6. *Halekas J.S., Brain D.A., Ruhunusiri et al.* Plasma clouds and snowplows: Bulk plasma escape from Mars observed by *MAVEN* // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 1426–1434. <https://doi.org/10.1002/2016GL067752>
7. *Ruhunusiri S. et al.* MAVEN observations of partially developed Kelvin-Helmholtz vortices at Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 4763–4773. <https://doi.org/10.1002/2016GL068926>
8. *Chandrasekhar S.* Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. N.Y.: Oxford Univ. Press, 1961.
9. *Johnson J.R., Wing S., Delamere P.A.* Kelvin Helmholtz Instability in Planetary Magnetospheres // *Space Science Review*. 2014. V. 184. P. 1–31. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0085-z>
10. *McFadden J.P., Kortmann O., Curtis D. et al.* MAVEN SupraThermal and Thermal Ion Composition (STATIC) Instrument // *Space Science Review*. 2015. V. 195. P. 199–256. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0175-6>
11. *Mitchell D.L., Mazelle C., Sauvaud J.A. et al.* The MAVEN Solar Wind Electron Analyzer // *Space Science Review*. 2016. V. 200. P. 495–528. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0232-1>
12. *Connerney J.E.P., Espley J., Lawton P. et al.* The MAVEN Magnetic Field Investigation // *Space Science Review*. 2015. V. 195. P. 257–291. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0169-4>
13. *Fang X. et al.* The Mars crustal magnetic field control of plasma boundary locations and atmospheric loss: MHD prediction and comparison with MAVEN // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. P. 4117–4137. <https://doi.org/10.1002/2016JA023509>
14. *Penz T., Erkaev N.V., Biernat H.K. et al.* Ion loss on Mars caused by the Kelvin-Helmholtz instability // *Planetary and Space Science*. 2004. V. 52. № 13. P. 1157–1167. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.06.001>
15. *Hasegawa H. et al.* Kelvin-Helmholtz waves at the Earth’s magnetopause: Multiscale development and associated reconnection // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A12207. <https://doi.org/10.1029/2009JA014042>
16. *Khrabrov A.V., Sonnerup B.U.Ö.* DeHoffmann-Teller analysis, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*. N.Y.: Springer, 1998.
17. *Hurley D.M., Dong Y., Fang X. et al.* A proxy for the upstream IMF clock angle using MAVEN magnetic field data // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2018. V. 123. P. 9612–9618. <https://doi.org/10.1029/2018JA025578>
18. *Hasegawa H., Fujimoto M., Takagi K. et al.* Single-spacecraft detection of rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices at the flank magnetopause // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A09203. <https://doi.org/10.1029/2006JA011728>

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2021 г.

**Абезяев И.Н.** Гирокомпас для орбитальных космических аппаратов № 3. С. 247.

**Аникин А.А., Дьячкова М.В., Литвак М.Л., Митрофанов И.Г., Мокроусов М.И., Никифоров С.Ю., Санин А.Б.** Перспективный эксперимент с гамма-спектрометром на борту мобильного космического аппарата для изучения элементного состава вещества Луны, Марса и других небесных тел без атмосферы или с тонкой атмосферой № 1. С. 44.

**Ахметшин Р.З.** Влияние возмущений при многовитковых перелетах на геостационарную орбиту № 5. С. 377.

**Базилевская Г.А., Дюсембекова А.С., Калинин М.С., Крайнев М.Б., Махмутов В.С., Свирижевская А.К., Свирижевский Н.С., Стожков Ю.И., Тулеков Е.А.** Сравнение результатов по высыпаниям высокоэнергичных электронов в стратосфере и на спутниках № 1. С. 28.

**Беклемишев Н.Д., Богуславский А.А., Беляев М.Ю., Волков О.Н., Сазонов В.В., Соколов С.М., Софинский А.Н.** Исследование колебаний элементов конструкции космической станции по видеоинформации № 3. С. 218.

**Беляев М.Ю., Матвеева Т.В., Монахов М.И., Рулев Д.Н., Сазонов В.В.** Реконструкция вращательного движения кораблей Прогресс в режиме одноосной солнечной ориентации по данным измерений тока солнечных батарей № 2. С. 149.

**Богод В.М., Стороженко А.А., Тлатов А.Г., Кузаян К.М., Абуни А.А., Лесовой С.В., Pons Omar, Uratsuka Marta, Zaldívar Ramses, Pablo Sierra.** Разработка проекта реконструкции Гаванской радиоастрономической станции в составе Российских служб Солнца и Космической Погоды № 2. С. 102.

**Бреус Т.К., Веригин М.И., Котова Г.А., Славин Дж.А.** Особенности магнитосферы Марса по данным спутников *Марс-3* и *Фобос-2*: сопоставление с результатами *MGS* и *MAVEN* № 6. С. 504.

**Власова Н.А., Тулупов В.И., Калегаяев В.В.** Некоторые особенности солнечных протонных событий 7.III.2011 и 20.II.2014 № 4. С. 296.

**Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павелье А.А.** Вариации параметров радиоволн в высокоширотной ионосфере Земли на трассах спутник–спутник во время геомагнитной бури 22–23.VI.2015 № 3. С. 191.

**Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е., Козелов Б.В.** Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 2. Энергетические спектры высыпающихся электронов № 5. С. 355.

**Доброславский А.В.** Об оценке среднего времени пребывания ИСЗ в земной тени при движении в плоскости эклиптики № 3. С. 240.

**Ельников Р.В.** Использование функций Ляпунова для вычисления локально-оптимального управления вектором тяги при межорбитальном перелете с малой тягой № 3. С. 255.

**Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю., Рязанцева М.О., Хохлачев А.А.** Некоторые вопросы идентификации крупномасштабных типов солнечного ветра и их роли в физике магнитосферы. 4. “Потерянный драйвер” № 1. С. 35.

**Заболотнов Ю.М.** Резонансные эффекты при движении малого космического аппарата вокруг центра масс в составе развертываемой тросовой системы № 4. С. 339.

**Ивашкин В.В.** Влияние сжатия Земли на интеграл энергии и некоторые характеристики орбиты космического аппарата № 5. С. 373.

**Игнатов А.И., Сазонов В.В.** Исследование установившихся движений искусственного спутника Земли в режиме одноосной магнитной ориентации № 2. С. 135.

**Каленова В.И., Морозов В.М.** Стабилизация положения относительного равновесия спутника при помощи магнитных и лоренцевых моментов № 5. С. 393.

**Калинин Е.В., Филиппов М.В., Махмутов В.С., Максумов О.С., Стожков Ю.И., Квашнин А.А., Измайлов Г.Н., Озолин В.В.** Исследование характеристик детектора терагерцового излучения для научной аппаратуры “Солнце-Терагерц” № 1. С. 3.

**Капорцева К.Б., Шугай Ю.С.** Использование DBM модели для прогноза прихода корональных выбросов массы к Земле № 4. С. 315.

**Каратунов М.О., Баранов А.А., Голиков А.Р.** Оценка вероятности столкновения околоземных космических объектов с учетом формы и ориентации № 5. С. 385.

**Ким К.И., Шувалов С.Д.** Наблюдение неустойчивости плазмы между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса № 6. С. 519.

**Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Тимченко А.В., Миронова И.А., Розанов Е.В.** О возможных причинах положительного возмущения глобального электронного содержания в период сложного гелио-геофизического события в сентябре 2017 года № 6. С. 483.

**Козелов Б.В., Дашкевич Ж.В., Иванов В.Е.** Исследование лучистых структур в полярных сияниях триангуляционными методами: 1. Высотный профиль объема интенсивности свечения № 4. С. 267.

**Козлов В.И.** Загоризонтное обнаружение мощного источника активности на Солнце по эффекту “гало” в космических лучах № 5. С. 361.

**Козлов В.И.** О вероятной смене статуса текущего неординарного сбоя 11-летней цикличности Солнца с локального на глобальный № 2. С. 92.

**Копытенко Ю.А., Петрова А.А., Гурьев И.С., Лабецкий П.В., Латышева О.В.** Анализ информативности магнитного поля Земли в околоземном космическом пространстве № 3. С. 177.

**Красильщиков М.Н., Кружков Д.М.** К вопросу об автономном уточнении параметров вращения Земли на борту космических аппаратов. Анализ возможностей развиваемой информационной технологии № 5. С. 408.

**Кугушева А.Д., Калегаяев В.В., Власова Н.А., Петров К.А., Базиловская Г.А., Махмутов В.С.** Пространственно-временная структура высыпаний энергичных электронов по данным баллонных наблюдений и измерений полярных спутников 1–6. II. 2015 № 6. С. 473.

**Леонов В.В., Гришко Д.А., Айрапетян М.А., Швыркина О.С., Никитин Г.А.** Тепловой анализ траекторий возвращения от Луны с несколькими входами в атмосферу для баллистической капсулы и аппаратов скользящего спуска № 3. С. 196.

**Ломакин М.И., Сухов А.В., Докукин А.В., Ниязова Ю.М.** Оценка показателей надежности космических аппаратов в условиях неполных данных № 3. С. 235.

**Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Шкляр Д.Р.** Наблюдение узкополосных квазипараллельных свистовых волн в зоне торможения быстрых потоков в ближнем геомагнитном хвосте по данным MMS № 1. С. 9.

**Манукин А.Б., Казанцева О.С., Калинин И.И., Матюнин В.П., Саякина Н.Ф., Тоньшев А.К., Черногорова Н.А.** Сейсмометр для наблюдений на Марсе № 5. С. 418.

**Матюгов С.С., Яковлев О.И., Павельев А.А.** Нижняя ионосфера Арктики в июне 2015 г. при сильной магнитной буре и солнечных рентгеновских вспышках по данным затменного радиозондирования на межспутниковых трассах GPS – Formosat № 2. С. 118.

**Мизонова В.Г., Беспалов П.А.** Особенности отражения свистовых электромагнитных волн, падающих на ионосферу сверху, в дневных и ночных условиях № 1. С. 19.

**Миронов В.В., Муртазов А.К.** Ретроспектива проблемы космического мусора. Ч. 2. Мониторинг космического мусора естественного происхождения в околоземном пространстве оптическими методами метеорной астрономии № 1. С. 51.

**Михалев А.В.** Долгоживущие метеорные следы, сформированные при радиальном расширении крупных метеороидов № 6. С. 498.

**Муранов А.Н.** Парето-оптимальные требования к точности отражающей поверхности параболических рефлекторов зеркальных космических антенн для перспективных частот № 1. С. 63.

**Мягкова И.Н., Богомолов А.В., Еремеев В.Е., Ширяев А.О., Гинзбург Е.А.** Динамика радиационной обстановки в околоземном пространстве в

сентябре-ноябре 2020 по данным спутников *Метеор-М* и *Электро-Л* № 6. С. 460.

**Павлова Е.А., Захваткин М.В., Стрельцов А.И., Воропаев В.А., Еленин Л.В.** Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве № 2. С. 126.

**Пенсионеров И.А., Беленькая Е.С., Алексеев И.И.** Модель токового диска Юпитера с параметрами, оптимизированными по измерениям магнитного поля во время миссий Juno и Galileo № 3. С. 209.

**Сапунков Я.Г., Челноков Ю.Н.** Решение задачи оптимального вывода на орбиту космического аппарата с использованием реактивного ускорения и солнечного паруса в переменных Кустанхаймо–Штифеля № 4. С. 327.

**Синевиц А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Милох В.Я., Могилевский М.М.** Пространственная структура поляризованного джета по данным спутников *NorSat-1* и *Swarm* № 6. С. 489.

**Соболевский Н.М., Латышева Л.Н., Кузнецов Н.В., Панасюк М.И., Подзолко М.В.** Моделирование потоков частиц и поглощенной дозы за защитой от космических лучей с использованием транспортного кода Shield № 4. С. 306.

**Томилин А.К., Зиякаев Г.Р.** Собственные колебания крыла солнечной батареи космического аппарата № 1. С. 71.

**Угольников О.С., Маслов И.А.** Измерения высоты и размера частиц пост-вулканического аэрозоля на основе поляриметрии сумеречного неба № 2. С. 111.

**Улыбышев Ю.П.** Оптимизация пространственных траекторий посадки на Луну: области достижимости, перенацеливание и ограничение по профилю снижения № 1. С. 78.

**Фролов В.Л., Лукьянова Р.Ю., Рябов А.О., Болотин И.А.** Спутниковые измерения плазменных возмущений и электрических токов, индуцируемых в среднеширотной ионосфере при ее модификации мощными КВ радиоволнами № 4. С. 275.

**Харлан А.А., Биктимиров Ш.Н., Иванов А.Б.** Перспективы развития глобальных спутниковых группировок связи в контексте формирования новых сервисов на рынке телекоммуникационных услуг № 2. С. 165.

**Хохлачев А.А., Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г.** Вариации протонов и дважды ионизированных ионов гелия в солнечном ветре № 6. С. 443.

**Шмальц С.Е., Новичонок А.О., Воропаев В.А., Грациани Ф., Абдель-Азиз Й., Абдельазиз А.М., Теалиб Ш.К.** Методика фотометрии быстровращающихся ИСЗ с использованием ПЗС-камеры медленного считывания № 5. С. 428.

**Янке В.Г., Белов А.В., Шлык Н.С., Кобелев П.Г., Трефилова Л.А.** Экспериментальный спектр вариаций космических лучей в широком диапазоне жесткостей по данным AMS-02 № 6. С. 454.