

ISSN 0023-4206

Том 61, Номер 1

Январь - Февраль 2023



КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 61, номер 1, 2023

Энергетические спектры надтепловых ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe на 1 а.е. в потоках частиц из корональных дыр в 23 и 24 циклах солнечной активности <i>М. А. Зельдович, Ю. И. Логачев</i>	3
Ионный состав железа в потоках солнечного ветра в короне Солнца и гелиосфере <i>Ф. Ф. Горяев, В. А. Слемзин, Д. Г. Родькин, Ю. С. Шугай</i>	10
Взаимосвязь параметров магнитосферы с жесткостью обрезания космических лучей в зависимости от широты <i>О. А. Данилова, Н. Г. Птицына, М. И. Тясто, В. Е. Сдобнов</i>	21
Спектрорадиометрия солнечной короны на РАТАН-600 <i>В. М. Богод, М. К. Лебедев, Н. Е. Овчинникова, А. М. Рипак, А. А. Стороженко</i>	31
Характеристики солнечного ветра и геомагнитных условий при экстремальных ГИТ на станции Выходной (2012–2018) <i>Д. А. Шевелева, С. В. Апатенков, Я. А. Сахаров, В. Н. Селиванов, Е. И. Гордеев</i>	39
Об остаточной модуляции галактических космических лучей в гелиосфере <i>В. Г. Янке, А. В. Белов, Р. Т. Гущина, П. Г. Кобелев, Л. А. Трефилова</i>	43
Исследования Луны автоматическими космическими аппаратами <i>М. Я. Маров</i>	52
Предварительные результаты обработки данных дозиметра “ТРИТЕЛЬ” в составе космического эксперимента “Матрешка-Р” на борту российского сегмента <i>Международной космической станции</i> <i>А. Э. Лишневский, В. А. Шушаков, Д. А. Карташов</i>	78

УДК 523

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ^3He , ^4He , C, O И Fe НА 1 а.е. В ПОТОКАХ ЧАСТИЦ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В 23 И 24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2023 г. М. А. Зельдович¹, *, Ю. И. Логачев¹¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*ms.zeldovich@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

После доработки 07.07.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

Изучались энергетические спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe с энергиями 0.04–2 МэВ/нуклон на 1 а.е. в потоках солнечного ветра из приэкваториальных корональных дыр на спаде солнечной активности в 23-ем цикле по информации приборов ULEIS, SWICS и SWEPAM, установленных на КА ACE. Результаты данной работы показывают, что надтепловые ионы из корональных дыр являются ионами максвелловского солнечного ветра, ускоренными на Солнце и/или в межпланетном пространстве и образующими высокоэнергичный вклад в ионы солнечного ветра (надтепловой “хвост” в энергетическом распределении ионов солнечного ветра). Энергетические спектры ускоренных ионов “хвоста” имеют разную зависимость от энергии, что говорит о различных механизмах их ускорения. Связь интенсивности надтепловых ионов со скоростью солнечного ветра свидетельствует об эффективности ускорения ионов максвелловского солнечного ветра.

DOI: 10.31857/S0023420623010065, EDN: FIHUMH

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная корона состоит из горячей плазмы $\geq 10^6$ К, из которой вглубь Солнечной системы постоянно вытекают потоки частиц, унося с собой глобальное корональное магнитное поле Солнца. Этот поток солнечного ветра и определяет гелиосферу. Солнечный ветер (СВ) достаточно динамичен и наполнен ионами разного состава с разными энергетическими спектрами. Структуры потоков СВ имеют различные масштабы, на них могут накладываться или включать в себя различные образования, такие как корональные выбросы массы (КВМ), коротирующие области взаимодействия разноскоростных потоков (CIR), образующиеся из-за соседства регионов с более быстрым и более медленным ветром в сочетании с вращением Солнца, создавая области сжатия, где быстрый ветер нагоняет медленный, оставляя за собой разреженные регионы позади [1–4]. В настоящее время принято традиционное разделение СВ по скорости на “быстрый” и “медленный” ветер, которые являются эмпирически связанными с крупномасштабными солнечными структурами: корональными дырами (КД) и корональными стримерами, соответственно. Данные КА *Ulysses* показали, что высокоширотный

СВ имеет гораздо большую скорость, чем экваториальный [5, 6].

Кроме крупномасштабных структур, которые всегда создаются Солнцем, существуют мелкомасштабные структуры, развивающиеся в пространстве с помощью различных механизмов. Разнообразные спектры флуктуаций магнитного поля в таких потоках могут ускорять несомые заряженные частицы [7, 8].

Потоки ускоренных частиц из КД в области CIR наблюдаются уже давно [9–10]. Механизмы ускорения надтепловых ионов He в области коротирующих областей взаимодействия разноскоростных потоков СВ изучались в [11–14]. Авторы обсуждают возможность существования длительного ускорения (доускорения) ионов в межпланетном пространстве при распространении ионов от Солнца в межпланетном пространстве и также в области сжатия на замыкающей кромке CIR.

Как дополнение к этим ускоренным энергичным частицам нами изучаются потоки надтепловых (0.04–2 МэВ/нуклон) ионов из КД, не связанные с областями взаимодействия CIR. Максимум интенсивности этих ионов наблюдался одновременно с максимумом скорости СВ из КД в замыкающей области CIR [15, 16]. В настоящее время нет четкого представления о природе и ме-

механизмах возникновения этих, как будет показано далее, долгоживущих потоков надтепловых частиц. В задачу данной статьи входит изучение потоков надтепловых ионов из КД, их некоторых детальных характеристик, наиболее важными из которых являются: состав ионов в потоках СВ и состав надтепловых ионов в потоках из КД, энергетические спектры этих ионов, зависимость их интенсивности от скорости СВ.

Кроме того, задача изучения потоков из КД важна потому, что динамический солнечный ветер и встроенные разномасштабные структуры магнитного поля постоянно взаимодействуют со всеми планетами Солнечной системы и работающими там космическими аппаратами. Потоки из КД являются средой, через которую распространяются крупные магнитные структуры с энергичными частицами и обеспечивается фундаментальная передача энергии от Солнца в гелиосферу, что формирует реальную космическую погоду.

Одним из параметров радиационной обстановки в межпланетном пространстве является интенсивность потоков ионов надтепловых энергий в различные периоды солнечной активности (СА). Относительное содержание надтепловых ионов с энергиями 0.04–1 МэВ/нуклон в спокойные периоды солнечной активности в 23-ем цикле изучалось в [17–21], где было показано, что величины отношений C/O и Fe/O в спокойное время зависят от уровня солнечной активности. В максимуме цикла относительное содержание этих ионов было близко к содержанию во вспышках СКЛ, а в минимуме цикла — к значениям в солнечном ветре и/или в коротящих областях взаимодействия разноскоростных потоков СВ.

Значимыми источниками ионов являются корональные дыры (КД) на Солнце, состав потоков ионов из которых изучался нами ранее в [15, 16], где были получены величины относительных содержаний надтепловых ионов ${}^4He/O$, C/O и Fe/O в потоках частиц из КД в спокойные периоды 23 и 24-го солнечных циклов. Были проанализированы и сопоставлены относительные содержания тепловых и надтепловых ионов ${}^4He/O$, C/O и Fe/O в потоках солнечного ветра из приэкваториальных корональных дыр в 2006–2012 и 2015–2017 гг. Потоки ионов с энергиями ~0.04–2 МэВ/нуклон были изучены с использованием данных прибора ULEIS на борту КА ACE вместе с тепловыми ионами в быстром и медленном (максвелловском) солнечном ветре по данным прибора SWICS (КА ACE). Получено, что величины отношений C/O и Fe/O надтепловых ионов были равны их относительному содержанию в потоках СВ, в то время как величина надтепловых ${}^4He/O$ в SC23 иногда превышала соответствующее значение в СВ более чем в два раза. В обоих циклах величины тепловых и надтепловых Fe/O демон-

стрировали одинаковый характер зависимостей от максимальной скорости солнечного ветра из КД. Результаты этого исследования свидетельствовали о том, что источниками надтепловых ионов из КД в периоды низкой СА являются ускоренные тепловые ионы СВ. Проведенное сравнение состава ионов в потоках СВ с составом надтепловых ионов из КД разных энергий позволило предположить, что ускорение ионов до надтепловых энергий происходит в процессе движения потоков частиц от Солнца на всем пути в межпланетном пространстве, согласно с результатами, полученными в [12–14], а не только в момент создания и выхода потоков из корональных дыр.

В настоящей работе изучались ионный состав и энергетические спектры ионов 4He , 3He , C , O и Fe в диапазоне энергий 0.04–2 МэВ/нуклон в рекуррентных потоках ионов на 1 а.е. из приэкваториальных КД на спаде СА в 23-ем и 24-ом циклах. Параметры солнечного ветра и информация по потокам ионов из КД определялись по данным приборов SWEPAM, ULEIS и SWICS (КА ACE в точке L1), также использовались данные сайта ‘Coronal Hole History’. Критериями определения потока ионов из корональной дыры служили условия: $O^7/O^6 < 0.014$ и $Q(Fe) = 9–10$ [23, 24] и одновременное возрастание скорости СВ из КД.

1. ДОЛГОЖИВУЩИЕ ПОТОКИ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Свойства изучаемых здесь таких явлений, как энергичные потоки частиц из КД, зависят от уровня СА в разные периоды солнечного цикла. В минимумах СА в 2010 г. и в 2020 г. наблюдались как минимальное число КД, так и минимальная скорость солнечного ветра из КД (рис. 1). На спаде солнечной активности в 23-ем и 24-ом циклах (2006–2009 гг. и 2015–2018 гг.) число ($N_{кд}$) всех приэкваториальных КД в году и также величина максимальной скорости солнечного ветра в году V_{sw} из этих КД, изменялись в фазе с числом солнечных пятен R_z . Рисунок 1 демонстрирует число солнечных пятен в году R_z (сплошные ромбы), максимальную скорость солнечного ветра в году V_{sw} из КД (кружки) и число корональных дыр $N_{кд}$ (треугольники). Данные по величинам V_{sw} и $N_{кд}$ получены из сайта ‘Coronal Hole History’. Изучаемые здесь наиболее длительные рекуррентные потоки ионов CHI и $CH2$, более чем 10 солнечных оборотов, были обнаружены на спаде 23-го цикла СА в 2006–2009 гг. Потоки солнечного ветра и малоэнергичных ионов из КД испытывали сильные вариации в течении существования рекуррентных потоков ионов.

Эволюция скорости солнечного ветра в потоках, одновременных с потоками ионов, показана

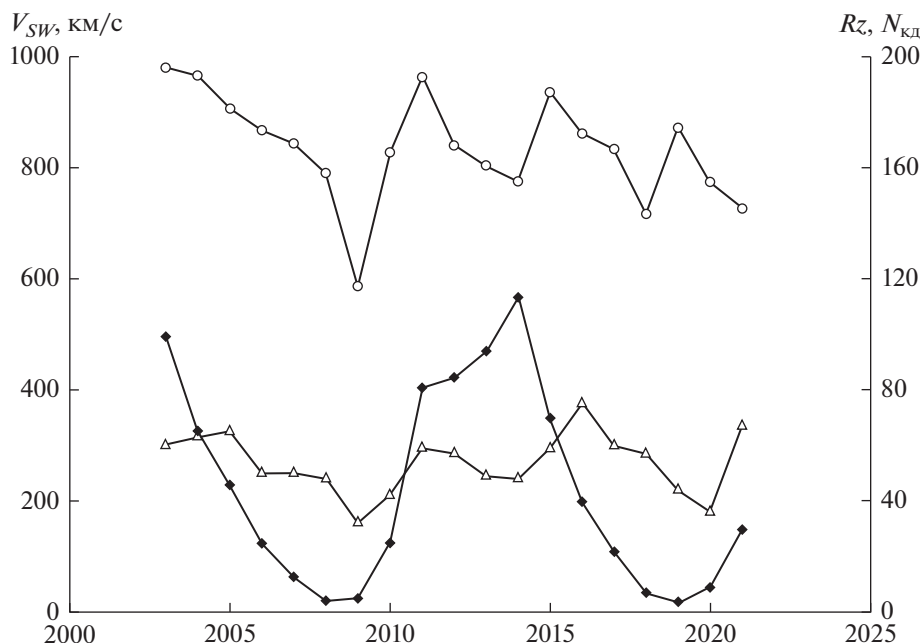


Рис. 1. Число солнечных пятен в году R_z (сплошные ромбы), максимальная скорость солнечного ветра из КД в году V_{SW} (кружки) и число корональных дыр в году N_{KD} (треугольники). Данные по величинам V_{SW} и N_{KD} получены из сайта “Coronal hole history”.

на рис. 2. Как видно из рисунка, величины V_{SW} достигали максимума на срединных оборотах существования потока ионов. Одновременно с потоками солнечного ветра из КД регистрировалось повышение интенсивностей надтепловых ионов, также как наблюдалось в [12–16]. На спаде 23-го цикла наблюдались наиболее долгоживущие рекуррентные потоки малоэнергичных ионов – со временем жизни >10 солнечных оборотов. Одновременно регистрировалось повышение скорости СВ, которая достигала максимума к середине времени жизни потока ионов (рис. 2а). Такая же закономерность видна на рис. 2б для всех рекуррентных потоков ионов в 24-ом цикле, где самый длительный поток существовал 17 оборотов Солнца.

2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ИЗ ПРИЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Энергетические спектры надтепловых ионов в потоках частиц из КД характеризуют механизмы ускорения ионов непосредственно в КД и в процессе распространения в межпланетном пространстве. Спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe с энергиями 0.04–2 МэВ/нуклон были получены в 2006–2012 и в 2015–2018 гг. во время регистрации на 1 а.е. максимального потока частиц из КД. Спектры были аппроксимированы либо степенной функцией ($J(E) \sim E^{-\gamma}$ с показателем γ), либо,

при нарушении степенного закона (уменьшение потока при возрастании энергии ионов), комбинацией степенной и экспоненциальной функциями ($J(E) \sim E^{-\gamma} \exp(-E/E_0)$). На рис. 3 приведены спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe в потоках энергичных частиц из долгоживущего потока ионов **CH1** в 2006–2007 гг. Спектры ^4He были аппроксимированы степенной функцией (спектры а, б, е) и комбинацией двух функций – степенной и экспоненциальной (спектры в, д, г и ж). Видно, что спектры ионов в 2006 г. имели степенной вид $J = AE^{-\gamma}$, а в 2007 г. спектры лучше аппроксимировались произведением экспоненциальной и степенной функций $J(E) \sim E^{-\gamma} \exp(-E/E_0)$, величины E_0 были взяты из [25–27]. При аппроксимации 98 спектров получены значения $2 < \gamma < 6$, что означает наличие разных условий в областях ускорения надтепловых ионов в потоках из КД. Величины γ , полученные при аппроксимациях, приведены на рис. 4. Фиск и Глеклер [27] в модели ускорения ионов до надтепловых энергий в турбулентной среде в спокойное время СА получили спектры вида $J = A(E^{-\gamma}) \exp(-E/E_0)$ с показателем $\gamma = 1.5$. В данной работе оценка величин γ степенной части спектров ^4He показала их вариации в диапазоне 2–6, при этом только шесть спектров ионов O и Fe имели $\gamma < 2$ (см. рис. 4). Нужно отметить, что параметры спектров различного вида не зависели от скорости солнечного ветра из корональных дыр, при этом интенсивность ионов была наименьшей на первом обороте

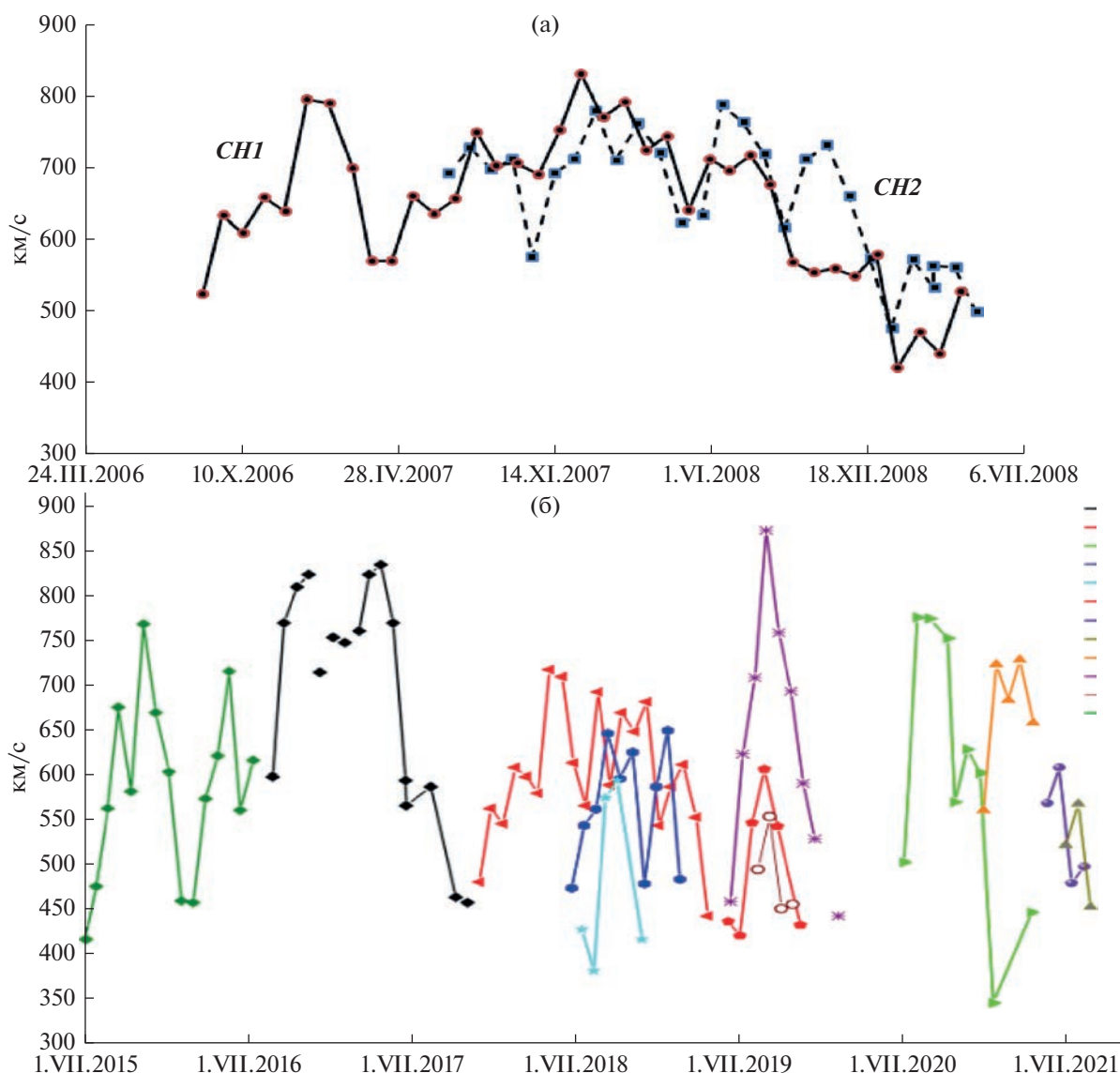


Рис. 2. (а) Максимальные скорости солнечного ветра из корональных дыр в южном полушарии (*CH1*) и вблизи экватора (*CH2*) на каждом обороте Солнца в 23-ем цикле СА, сопровождавшихся повышенными потоками надтепловых ионов в течении >10 оборотов Солнца (*CH1* – сплошная кривая и *CH2* – пунктирная кривая), (б) максимальные скорости СВ из КД с потоками ионов в 24-ом цикле СА.

потока ионов *CH1*. Спектры ионов с наибольшей крутизной наблюдались в потоках частиц на первых оборотах долгоживущих потоков.

Интенсивность надтепловых ионов из КД в среднем зависела от скорости СВ. На рис. 5 даны энергетические спектры ионов, усредненные по одновременно измеренной величине V_{SW} . Видно, что спектр каждого из ионов сдвигается в область больших энергий при увеличении скорости СВ. Спектры ионов, усредненные по скоростям солнечного ветра V_{SW} из КД, представленные на рис. 5, демонстрируют зависимость усредненной интенсивности ионов от скорости V_{SW} из КД. С увеличением скорости V_{SW} от <600 до >700 км/с, ин-

тенсивность всех надтепловых ионов возрастала. Этот эффект также указывает на то, что популяцией частиц, ускоренной до надтепловых энергий, могут служить тепловые (максвелловские) ионы солнечного ветра из КД.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Наблюдаемая картина распределения ионов по энергии свидетельствует о существовании высокотемпературного “хвоста” в солнечном ветре из КД. Причиной этого может быть как непосредственное ускорение ионов в источнике, в самой корональной дыре, так и ускорение ионов при

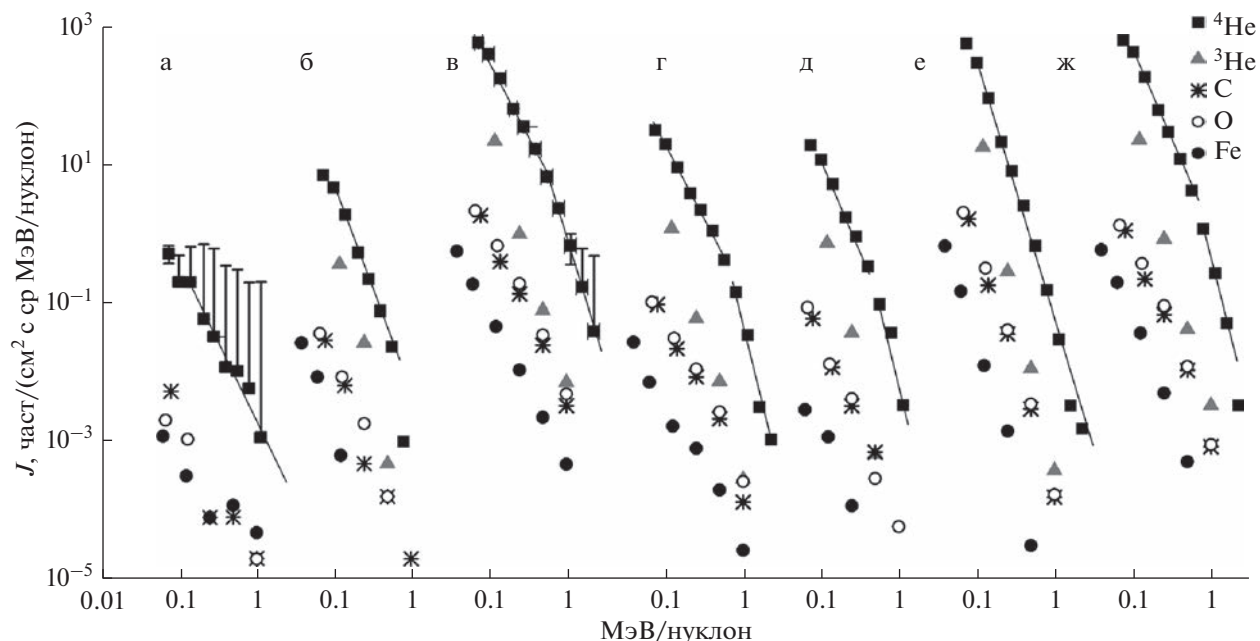


Рис. 3. Спектры ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe в потоках энергичных частиц из КД в 2006–2007 гг. в течение 7 следующих периодов регистрации ионов (а) 22–23.VIII.2006, (б) 18–19.IX.2006, (в) 29–31.I.2007, (г) 11–12.VII.2007, (д) 25–26.X.2007, (е) 23–24.XI.2007, (ж) 18–19.XII.2007. Спектры обозначены следующими символами: ^4He – квадраты, ^3He – треугольники, C – крестики, O – пустые кружки и Fe – черные кружки. Спектры были аппроксимированы степенной функцией (^4He , спектры а, б и е), либо комбинацией двух функций – степенной и экспоненциальной (спектры в, г, д и ж). Интенсивность ионов J дана в $\text{част}/(\text{см}^2 \text{ с ср МэВ/нуклон})$. Величины γ приведены на рис. 4.

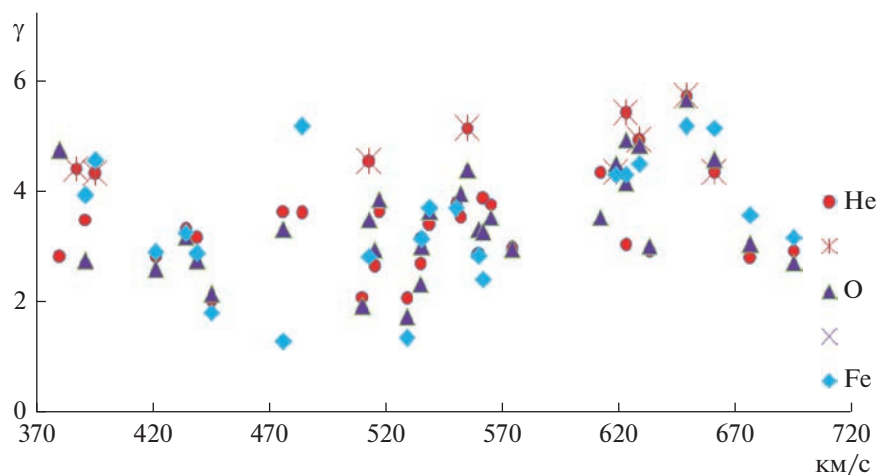


Рис. 4. Показатели γ энергетических спектров надтепловых ионов из корональных дыр в зависимости от скорости солнечного ветра, полученные при аппроксимации спектров степенной функцией $J(E) \sim E^{-\gamma}$ (наиболее крутые спектры обозначены Ж) и также при аппроксимации комбинацией двух функций $J(E) \sim E^{-\gamma} \exp(-E/E_0)$.

распространении жгута частиц из КД в процессе многократного взаимодействия ионов с магнитным полем, несомого потоком движущейся турбулизованной плазмы. Спектры частиц в результате этих механизмов ускорения могут отличаться, что сказывается на вариациях спектров в зависимости от вклада обоих источников в общий поток частиц, измеряемых на больших расстоя-

ниях от Солнца. Наблюдаемое увеличение интенсивности надтепловых ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe в потоке из КД с увеличением скорости солнечного ветра подтверждает связь высокотемпературного “хвоста” в солнечном ветре с механизмом ускорения потоков ионов из КД. В проведенном ранее изучении химсостава 0.04–2 МэВ/нуклон ионов C, O и Fe в потоках частиц из КД в 23-ем и 24-ом цик-

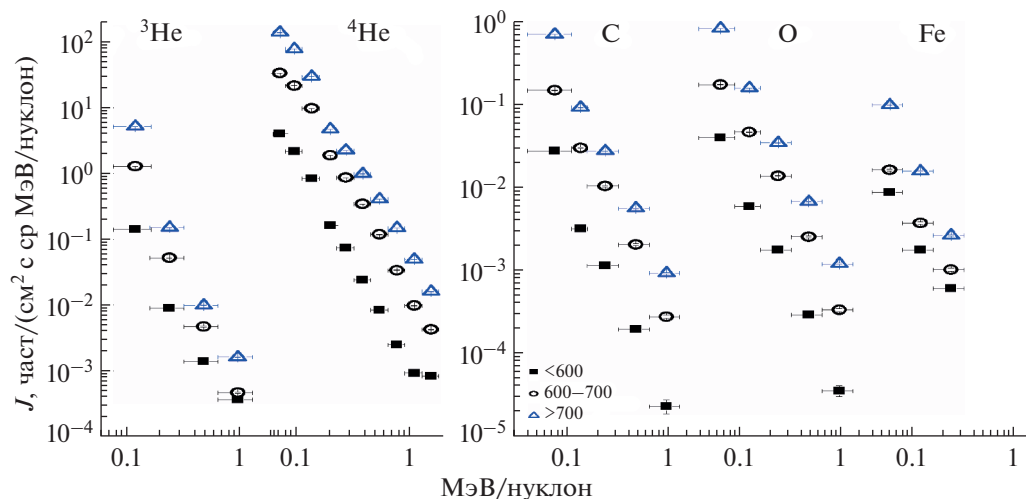


Рис. 5. Спектры надтепловых ионов ^3He , ^4He , C, O и Fe в потоках частиц из КД, усредненные по трем интервалам скорости солнечного ветра: <600 км/с (квадраты), 600–700 км/с (кружки) и >700 км/с (треугольники) из 25 корональных дыр в 2015–2017 гг.

лах СА [16] было показано, что величины содержания ионов C/O и Fe/O соответствовали содержанию этих ионов в тепловом (максвелловском) СВ.

Полученные результаты изучения ионного состава и энергетических спектров ионов с энергиями 0.04–2 МэВ/нуклон из КД указывают на возможность того, что надтепловые ионы из КД являются высокотемпературным продолжением тепловых ионов солнечного ветра, т.е. представляют собой ускоренные тепловые ионы солнечного ветра. При этом проблемы определения области и механизма ускорения ионов остаются открытыми – тепловые ионы солнечного ветра с низкими и высокими значениями FIP могут быть ускорены до надтепловых энергий как в солнечной короне, так и в межпланетном пространстве разными механизмами ускорения ионов при разных условиях в короне Солнца в областях возникновения КД. Аппроксимация 98 спектров дала большой диапазон величины $2 < \gamma < 6$, что подтверждает наличие разных условий в областях ускорения ионов в потоках из КД.

Наличие изломов и отклонения спектров от степенного при возрастании энергии ионов скорее всего являются следствием постепенного изменения механизма ускорения, вместо степенного спектра возникает экспоненциальный, что можно рассматривать как изменение процессов ускорения по мере распространения потоков частиц из КД в межпланетное пространство.

Изучение химсостава и энергетических спектров надтепловых ионов в потоках частиц из корональных дыр на Солнце в 23–24-ом циклах дает дополнительную информацию для исследования этих механизмов ускорения.

Обнаруженное *Ulysses* возрастание скорости потоков солнечного ветра с гелиоширотой провоцирует вопрос: существует ли такой же высокотемпературный “хвост” в потоках энергичных частиц из полярных корональных дыр?

Экспериментальные данные по потокам заряженных частиц с приборов ULEIS и SWICS на космическом аппарате ACE были получены со следующих сайтов: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_ULEIS.html, http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/lvl2DATA_SWICS.html.

Данные о скорости СВ получены из сайта:

Coronal Hole History (CHH) site http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html.

Конфликт интересов: Авторы заявляют, что исследование проводилось в отсутствие каких-либо коммерческих или финансовых отношений, которые могли бы быть истолкованы как потенциальный конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neugebauer M., Snyder C.W. Solar Plasma Experiment // Science. 1962. V. 138. P. 1095–1097. <https://doi.org/10.1126/science.138.3545.1095-a>
2. Neugebauer M., Snyder C.W. Mariner 2 Observations of the Solar Wind: 1. Average Properties // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P. 4469–4484. <https://doi.org/10.1029/jz071i019p04469>
3. Gosling J., Pizzo V. Formation and Evolution of Corotating Interaction Regions and Their Three Dimensional Structure // Space Sci. Rev. 1999. V. 89. P. 21–52. <https://doi.org/10.1023/a:1005291711900>
4. Barnes C.W., Simpson J.A. Evidence for interplanetary acceleration of nucleons in corotating interaction re-

- gions // *Astrophysical Journal*. 1976. L. 210. 91B.
<https://doi.org/10.1086/182311>
5. *McComas D.J., Bame S.J., Barraclough B.L. et al.* Ulysses Return to the Slow Solar Wind // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1–4.
<https://doi.org/10.1029/97gl03444>
 6. *Marsden R.G.* Ulysses Explores the South Pole of the Sun // *ESA Bulletin*. 1995. № 82. P. 48–55.
 7. *Тверской Б.А.* Перенос и ускорение заряженных частиц в магнитосфере Земли // *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2008. С. 751–758.
 8. *Тверской Б.А.* Динамика радиационных поясов Земли. Москва. Наука. 1968.
 9. *Fisk L.A., Gloeckler G.* Acceleration and Composition of Solar Wind Suprathermal Tails // *Space Sci. Rev.* 2007. V. 130. P. 153.
<https://doi.org/10.1007/s11214-007-9180-8>
 10. *Cohen C.M.S., Christian E.R., Cummings A.C. et al.* Energetic Particle Increases Associated with Stream Interaction Regions // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2020. V. 246. № 2. P. 10.
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab4c38>
 11. *Ebert R.W., Dayeh M.A., Desai M.I., Mason G.M.* Corotating Interaction Region Associated Suprathermal Helium Ion Enhancements at 1 AU: Evidence for Local Acceleration at the Compression Region Trailing Edge // *Astrophysical J.* 2012. V. 749. № 1. P. 73–86.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/749/1/73>
 12. *Bucik R., Innes D.E., Mall U. et al.* Multi-Spacecraft Observations of Recurrent 3He-Rich Solar Energetic Particles // *Astrophysical Journal*. 2014. V. 786. P. 71–83.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/786/1/7>
 13. *Bucik R., Innes D.E., Mall U. et al.* Multi-Spacecraft Observations of Recurrent 3He-Rich Solar Energetic Particles // *Статья архив*. 2018. arXiv:1403.4856v1 [astro-ph.SR].
 14. *Viall N.M., DeForest C.E., Kepko L.* Mesoscale Structure in the Solar Wind // *Front. Astron. Space Sci.* 2021. V. 8.
<https://doi.org/10.3389/fspas.2021.735034>
 15. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сурова Г.М. и др.* Надтепловые ионы в потоках солнечного ветра из корональных дыр на 1 а.е. // *Астрон. журн.* 2016. Т. 93. С. 675.
 16. *Zeldovich M.A., Kecske-mety K., Logachev Yu.I.* Suprathermal Ions from Coronal Holes at 1 AU in Solar Cycles 23 and 24: Dependence of ion abundances on solar wind speed // 2021. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. V. 502. № 2. P. 2961–2969.
 17. *Lepri S.T., Landi E., Zurbuchen T.H.* Solar Wind Heavy Ions Over Solar Cycle 23: *Ace*/Swics Measurements // *Astrophysical Journal*. 2013. V 768. № 1. P. 94–107.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/768/1/94>
 18. *Zel'dovich M.A., Ishkov V.N., Logachev Yu.I., Kecske-mety K.* Ion abundances of low-energy quiet period particle fluxes at 1 AU // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* 2011. V. 75. № 6. P. 776.
 19. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Сурова Г.М.* Энергетические спектры и относительное содержание ионов С, О и Fe на 1 а.е. при спокойном Солнце // *Астрон. журн.* 2011. Т. 88. № 2. С. 409.
 20. *Zeldovich M.A., Logachev Yu.I., Surova G.M., Kecske-mety K.* Suprathermal Ions in Quiescent Periods at 1 AU in the 23rd and 24th Solar-Activity Cycles // *Astronomy Reports*. 2014. V 58. № 6. P 399–405.
<https://doi.org/10.1134/S1063772914050072>
 21. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И.* надтепловые ионы ^4He , О и Fe НА 1 а. е. В спокойное время в 2006–2012 гг. // *Известия РАН. Серия физическая*. 2017. Т. 81. № 2. С. 159–161.
<https://doi.org/10.7868/S0367676517020478>
 22. *Зельдович М.А., Логачев Ю.И., Кечкемети К.* Временные вариации потоков надтепловых ионов и их относительное содержание на 1 а.е. в 1998–2017 // *Астрономический Журнал*. 2019. Т. 96. № 6. С. 523–528.
<https://doi.org/10.1134/S0004629919060070>
 23. *Lee C.O., Luhmann J.G., de Pater I. et al.* Organization of Energetic Particles by the Solar Wind Structure During the Declining to Minimum Phase of Solar Cycle 23 // *Solar Phys.* 2010. V. 263. P. 239–261.
<https://doi.org/10.1007/s11207-010-9556-x>
 24. *Zhao L., Landi E., Fisk L.A. et al.* The coherent relation between the solar wind proton speed and O7+/O6+ ratio and its coronal sources // *AIP Conference Proceedings*. 2016. V. 1720. 020007.
<https://doi.org/10.1063/1.4943808>
 25. *Fisk L.A., Lee M.A.* Shock acceleration of energetic particles in corotating interaction regions in the solar wind // *Astrophysical Journal*. 1980. Part 1. V. 237. P. 6.
<https://doi.org/10.1086/157907>
 26. *Fisk L.A., Gloeckler G.* Particle Acceleration in the Heliosphere: Implications for Astrophysics // *Space Science Reviews*. 2012. V. 173. № 1–4. P. 433–458.
<https://doi.org/10.1007/s11214-012-9899-8>
 27. *Fisk L.A., Gloeckler G.* The case for a common spectrum of particles accelerated in the heliosphere: Observations and theory // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2014. V. 119. № 11. P. 8733–8749.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020426>

УДК 523.9

ИОННЫЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗА В ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В КОРОНЕ СОЛНЦА И ГЕЛИОСФЕРЕ

© 2023 г. Ф. Ф. Горяев^{1, *}, В. А. Слемзин¹, Д. Г. Родькин¹, Ю. С. Щугай²¹ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина МГУ
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*goryaev_farid@mail.ru

Поступила в редакцию 07.03.2022 г.

После доработки 11.05.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Анализ распределений ионов Fe по стадиям ионизации в плазме солнечного ветра (СВ) дает ценную информацию о формировании потоков СВ и процессах нагрева плазмы, а также для идентификации источников СВ на Солнце. При прохождении плазмы СВ через корону ее ионный состав эволюционирует и в конце концов “замораживается” на расстояниях порядка нескольких солнечных радиусов от поверхности Солнца, оставаясь далее практически неизменным в гелиосфере. Это дает возможность по зарядовому состоянию СВ получать информацию о физических условиях в его источнике и солнечной короне. Обычно используемый для характеристики распределений ионов Fe средний заряд Q_{Fe} не учитывает всех особенностей эволюции ионного состава, что не позволяет извлекать более детальную информацию о состоянии плазмы СВ. В настоящей работе для описания зарядового состояния ионов Fe введены три параметра $q4$, $q8$ и $q12$, характеризующие относительные фракции ионов с зарядами $Z = 0-7$, $8-11$ и $12-20$, соответственно, и условно соответствующие “холодной”, “средней” и “горячей” компонентам плазмы СВ. По данным измерений ионного состава Fe в 2010 г. на КА *STEREO-A* приводятся характерные значения этих параметров для разных типов потоков СВ. Рассматривается задача моделирования ионных распределений в плазме СВ по данным диагностики параметров корональных источников. На примере события, связанного с корональным выбросом массы 18.VIII.2010, показано, что рассчитанные по модельным распределениям параметры зарядового состояния ионов Fe в пределах ошибок хорошо согласуются с данными измерений.

DOI: 10.31857/S002342062301003X, EDN: FICEMK

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования ионного состава солнечного ветра (СВ) началось со времени его открытия и первых исследований на советских КА *Луна-2*, *Луна-3* (1959 г., [1]), на американской станции *Маринер-2* (1962 г., [2]) и советской станции *Венера-3* (1965 г.). Систематические исследования параметров СВ во внутренней гелиосфере проводились на окосолнечных КА *Helios-1* (1974–1986 гг.) и *Helios-2* (1976–1980 гг.) [3], а также в полярных областях на КА *ULYSSES* (1994–1995, 2000–2001 и 2006–2007 гг.) [4–8]. Регулярные измерения ионного состава СВ с 1997 г. проводятся в точке Лагранжа L1 прибором SWICS на КА *ACE* [9] и с 2006 г. на окосолнечной орбите приборами PLASTIC на КА *STEREO-A* и *-B* (до 2015 г.) [10]. В настоящее время измерения параметров ионов СВ в гелиосфере на разных расстояниях от Солнца выполняются на КА *Parker Solar Probe* (запущен в 2018 г., [11]) и *Solar Orbiter* [12].

В 1968 г. Хундхаузен и др. [13] обосновали предположение, что состояние ионизации СВ “замораживается” в короне на некоторой высоте от поверхности Солнца из-за расширения плазмы и падения ее плотности, и потом практически не меняется при движении в гелиосфере. Это позволяет по количеству ионов высокой кратности в СВ оценить температуру плазмы в нижних слоях короны. Однако, позже в работе [14] вывод о прямом соответствии ионного состава СВ корональной температуре был поставлен под сомнение. Начиная с 1990-х гг., с накоплением данных об ионном составе СВ на специализированных аппаратах *ACE*, *ULYSSES*, *STEREO* и др., была реализована возможность использования ионного состава СВ для широкого круга задач, включая определение элементного и зарядового состава в различных типах потоков СВ и идентификацию их типа и солнечных источников, изучение физических процессов в областях ускорения и нагрева плазмы СВ, исследование процессов взаимодействия

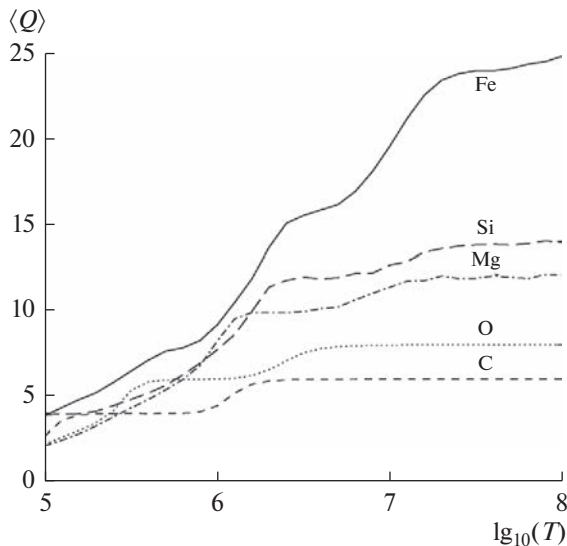


Рис. 1. Средние заряды ионов C, O, Mg, Si и Fe в термодинамически равновесной плазме как функции электронной температуры.

ствия потоков СВ в гелиосфере. Например, в работе [15] среди характерных признаков межпланетных корональных выбросов массы (МКВМ) были названы средний заряд ионов Fe $Q_{Fe} > 12$ и наличие ионов с высоким зарядом $Z \geq 16$.

В результате проведенных в работах [16–19] исследований эволюции ионного состава исходящих потоков плазмы, формирующих разные типы СВ, было показано, что в процессе ускорения зарядовый состав плазмы в короне изменяется в зависимости от скорости плазмы, плотности и температуры электронов, причем переходы между ионами с разным зарядом определяются соответствующими скоростями рекомбинации и ионизации. С учетом этих факторов, в работах [20, 21] было проведено моделирование ионного состава корональных выбросов массы (КВМ) на основании предположений о вариации с высотой плотности и температуры эруптирующей плазмы, которое показало качественное соответствие расчетов с измерениями. Следующим шагом в моделировании ионного состава КВМ в работе [22] было использование в качестве исходных радиальных профилей плотности и температуры плазмы, полученных в результате магнитогидродинамического расчета формирования магнитного жгута. В работе [23] в качестве исходных использовались плотность и температура электронов, полученные в результате анализа дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) плазмы, рассчитанной по многоволновым изображениям телескопа *SDO/AIA*. Хотя в работах [22, 23] рассчитанный по модели средний заряд Q_{Fe} в пределах ошибок лучше согласовался с измеренным в СВ, чувстви-

тельность рассчитанного Q_{Fe} к условиям в корональной плазме оказалась невысокой. Использование среднего заряда в качестве характеристики распределения ионов Fe приводит к потере информации о форме этого распределения, которое, помимо параметров плазмы, зависит также от скоростей рекомбинации/ионизации ионов. Соотношение между этими скоростями для ионов с разными Z может приводить к “замораживанию” плотностей ионов на разной высоте и отличию результирующего зарядового распределения плазмы СВ от распределений, которые соответствуют условиям ионизационного равновесия при определенной температуре. В настоящей работе рассматривается метод моделирования непосредственно зарядового распределения ионов Fe в плазме СВ с использованием параметров источников в солнечной короне, которые определяются с помощью анализа ДМЭ, восстанавливаемой по изображениям телескопа *SDO/AIA*. Пример такого моделирования продемонстрирован для события, связанного с КВМ 18.VIII.2010 [24], распространявшегося в направлении *STEREO-A*, на котором 20–23.VIII было зарегистрировано соответствующее возмущение СВ.

2. АНАЛИЗ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ ИОНОВ Fe В СВ ПО ДАННЫМ *STEREO-A*

Среди элементов, преобладающих в плазме СВ, железо является наиболее подходящим для характеристики физических условий в корональных источниках, поскольку значительное число ионов Fe разных стадий ионизации перекрывает практически весь диапазон корональных температур от спокойных областей до вспышек. На рис. 1 показана зависимость среднего заряда ионов ряда элементов, наиболее распространенных в короне Солнца и используемых в анализе состояния СВ, от температуры в стационарной равновесной плазме. Средний заряд ионов C, O, Mg, Si и Fe в функции от температуры был рассчитан с помощью базы атомных данных CHIANTI Version 10 (<https://www.chiantidatabase.org>). Из рис. 1 видно, что состояние ионов Fe изменяется в наиболее широком интервале температурных условий в плазме. Следует также отметить, что ионный состав Fe “замораживается” на больших высотах, чем ионы других тяжелых элементов, распространенных в СВ. Поэтому распределения ионов Fe лучше характеризуют состояние плазмы СВ.

В работе [25] была рассмотрена связь между параметром Q_{Fe} и соответствующими распределениями ионов Fe по данным прибора PLASTIC, установленного на борту космического аппарата *STEREO-A*, за период с января 2010 по июль 2011. PLASTIC представляет собой времяпролетный масс-спектрометр и предназначен для изучения параметров протонов, альфа-частиц и тяжелых

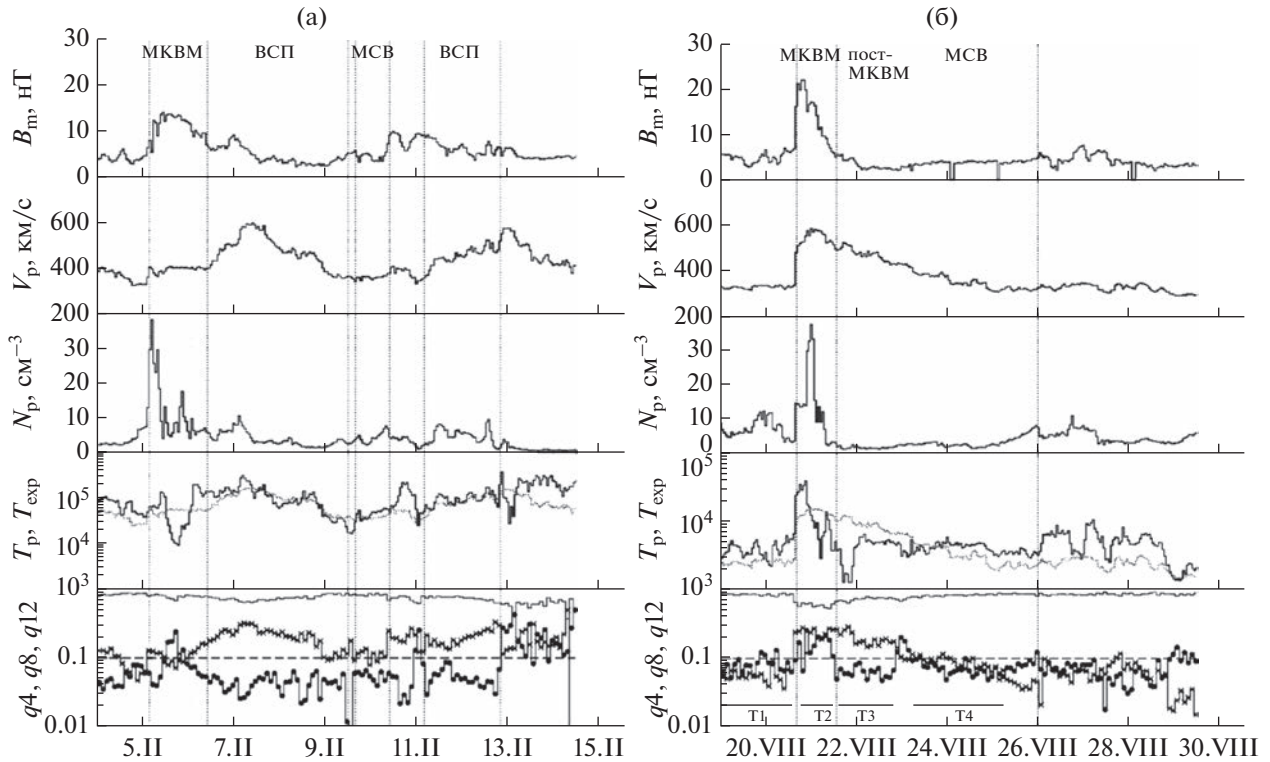


Рис. 2. Временные зависимости параметров СВ, зарегистрированных на PLASTIC/STEREO-A, и профили параметров $q4$, $q8$ и $q12$, рассчитанные по зарядовым распределениям ионов Fe для периодов 4.II–15.II.2010 (а) и 19.VIII–30.VIII.2010 (б). Сверху вниз показаны: модуль напряженности межпланетного магнитного поля B_m , скорость протонов V_p , плотность протонов N_p , температура протонов T_p и ожидаемая температура T_{exp} (пунктир), значения параметров зарядового распределения ионов Fe $q4$ (кресты), $q12$ (кружки) и $q8$ (сплошная линия).

ионов в плазме СВ. Прибор измеряет элементный состав, заряд, спектр и анизотропию гелиосферных ионов в области энергий от 0.3 до 80 кэВ/е. При обработке данных была учтена особенность построения гистограммы зарядового распределения ионов N_Z по бинам выходного сигнала B_Z (B_Z — число отсчетов в бине между зарядами Z и $Z+1$) с пересчетом по формуле $N_Z = (B_Z + B_{Z+1})/2$.

Для более детального анализа формы распределений в [25] был определен параметр $q12$, равный доле высокозарядных состояний ионов Fe с зарядами $Z \geq 12$ в плазме СВ. Было показано, что параметр $q12$ можно эффективно использовать для идентификации как крупномасштабных событий типа МКВМ с образованием горячей плазмы, так и горячих фрагментов в плазме СВ, которые могут быть связаны с мелкомасштабными проявлениями солнечной активности в различных корональных структурах. Также в [25] была дана интерпретация часто наблюдаемой бимодальной формы зарядового распределения ионов Fe в МКВМ. В настоящей статье, в развитие идей работы [25] мы вводим в рассмотрение три параметра $q4$, $q8$ и $q12$ по формулам:

$$\begin{aligned} q4 &= \sum_{0 \leq Z \leq 7} N_Z / \sum_{0 \leq Z \leq 20} N_Z, & q8 &= \sum_{8 \leq Z \leq 11} N_Z / \sum_{0 \leq Z \leq 20} N_Z, \\ q12 &= \sum_{12 \leq Z \leq 20} N_Z / \sum_{0 \leq Z \leq 20} N_Z, & q4 + q8 + q12 &= 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где N_Z — плотность ионов с зарядом Z , а указанные параметры соответствуют условно “холодной”, “средней” и “горячей” частям распределения ионов Fe в СВ. Дифференциация распределения ионов Fe по параметрам $q4$, $q8$, $q12$ позволяет извлечь более детальную информацию о состоянии плазмы СВ и выяснить, каким образом оно формируется в короне.

На рис. 2а и 2б приведены временные зависимости параметров СВ, зарегистрированных прибором PLASTIC [10] на STEREO-A 4.II–14.II.2010 и 19.VIII–29.VIII.2010, включая временные профили параметров $q4$, $q8$ и $q12$, с указанием типа потока СВ. На диаграмме с температурой протонов T_p пунктиром указана расчетная ожидаемая температура T_{exp} , соответствующая скорости протонов V_p [26]: $T_{exp} = (0.031V_p - 5.1)^2$ для $V_p < 500$ км/с, $T_{exp} = (0.51V_p - 142)$ для $V_p \geq 500$ км/с. Понижение температуры протонов ниже $0.5T_{exp}$ является од-

ним из признаков МКВМ [27]. Положения МКВМ указаны по каталогу событий STEREO-A (https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/data/ins_data/impact/level3/ICMEs.pdf), а высокоскоростных потоков (HSS – ВСП) по каталогу STEREO A/B SIR (Stream Interaction Regions – https://stereo-ssc.nascom.nasa.gov/data/ins_data/impact/level3/SIRs.pdf). Значения параметров q_4 , q_8 и q_{12} рассчитаны по зарядовым распределениям ионов Fe с двухчасовым усреднением, остальные параметры – с часовым усреднением.

На рис. 2 наглядно выделяются три типа крупномасштабных структур СВ: МКВМ, высокоскоростные потоки (ВСП) и потоки медленного СВ (МСВ), для которых профили параметров q_4 и q_{12} заметно различаются. Для МКВМ характерно значительное возрастание q_{12} выше условной границы 0.1 из-за присутствия горячей плазмы, при этом q_4 может быть как меньше, так и больше q_{12} . Профили ВСП отличаются значительным возрастанием q_4 выше 0.1 и падением q_{12} ниже 0.1, что связано с доминированием холодной компоненты в истекающем из короны потоке. Для потоков МСВ оба параметра близки к 0.1. Параметр q_8 дополняет сумму q_4 и q_{12} до 1 и характеризует разбалансированность зарядового распределения в сторону холодной или горячей компонент (или обоих сразу).

В настоящей работе был проведен расчет ионных параметров q_4 , q_8 и q_{12} для всех МКВМ и ВСП, зарегистрированных на КА STEREO-A в 2010 г. Всего было зарегистрировано 16 МКВМ длительностью от 10 до 90 часов и 42 ВСП длительностью от 18 до 224 часов при 2-х часовом усреднении. Статистический анализ показал, что для МКВМ средние по всем событиям значения q_4 и q_{12} примерно одинаковы (0.134 и 0.138, соответственно, при количестве точек 237), при этом среднее значение их отношения $\langle q_4/q_{12} \rangle = 1.44$. Корреляция между q_4 и q_{12} внутри МКВМ по всем значениям этих параметров практически отсутствует (коэффициент -0.05). Для ВСП средние значения по событиям составляют $\langle q_4 \rangle = 0.206$, $\langle q_{12} \rangle = 0.055$ при более заметной тенденции к антикорреляции (-0.4), причем $\langle q_4/q_{12} \rangle = 4.86$ (число точек 1603). В периоды отсутствия в СВ признаков МКВМ и ВСП, которые можно отнести к МСВ, средние значения равны $\langle q_4 \rangle = 0.081$, $\langle q_{12} \rangle = 0.085$ при слабой антикорреляции (-0.28 , число точек 2495). Такое соотношение соответствует максимуму распределения потока СВ, $V_p N_p$, по параметру q_{12} за период 2010 г. [25].

В следующих разделах более подробно обсуждается, что различия в параметрах q_4 и q_{12} для потоков разного типа определяются в первую очередь влиянием условий, в которых эти потоки формируются в солнечной короне – временными и высотными профилями скорости, плотности и

температуры, которые в свою очередь зависят от процессов нагрева и охлаждения плазмы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРЯДОВОГО СОСТОЯНИЯ ИОНОВ Fe В ПЛАЗМЕ КВМ И ВСП ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

При прохождении плазмы СВ через корону ее ионный состав эволюционирует в процессе изменения температуры, плотности и скорости и, в конце концов, из-за падения плотности в процессе расширения “замораживается” на расстояниях порядка нескольких солнечных радиусов от поверхности Солнца. Эволюция ионного состава в движущейся плазменной структуре СВ в короне может быть рассчитана с помощью уравнений баланса для плотностей ионов N_Z рассматриваемого элемента:

$$\partial N_Z / \partial t = N_e [N_{Z-1} C_{Z-1}(T_e) - N_Z (C_Z(T_e) + R_{Z-1}(T_e)) + N_{Z+1} R_Z(T_e)], \quad (2)$$

где N_e и T_e – электронная плотность и температура; C_Z – скорость ионизации для перехода $N_Z \rightarrow N_{Z+1}$; R_Z – полная (радиационная и диэлектронная) скорость рекомбинации для перехода $N_{Z+1} \rightarrow N_Z$. Для решения системы уравнений баланса (2) и нахождения с их помощью “замороженного” распределения ионов, требуется знать зависимости от времени параметров плазмы $N_e(t)$, $T_e(t)$, а также массовую скорость $V(t)$ плазмы СВ. Эти параметры определяются процессами нагрева и ускорения, влияющими на состояние плазмы СВ, и геометрией ее расширения в короне. Обычно временные профили этих параметров моделируются исходя из типичных условий в короне, например, по источникам СВ, таким как КВМ, корональные дыры (КД) или стримеры, либо определяются из измерений с помощью методов спектроскопической диагностики плазмы (см., например, [20, 23]).

Ионизационное состояние плазмы СВ определяется соотношением между двумя временными масштабами: временем расширения плазмы, $\tau_{\text{exp}} = N_e / (V dN_e / dr)$, и временем ионизации/рекомбинации, $\tau_{\text{ir}} = 1 / (C_Z + R_{Z-1}) N_e$, иона с зарядом Z (см., например, [13, 28]). Вблизи поверхности Солнца, при малых скоростях V и относительно большой электронной плотности N_e , где выполняется условие $\tau_{\text{exp}} \gg \tau_{\text{ir}}$, ионизационное состояние плазмы СВ соответствует ионизационному равновесию при температуре расширяющейся плазменной структуры. В процессе движения и расширения падает плотность и увеличивается скорость движения плазмы, в результате чего начинает нарушаться ионизационное равновесие. В первую очередь это проявляется для ионов с

меньшими скоростями рекомбинации, что приводит к более раннему “замораживанию” их плотностей и отклонению распределения ионов по стадиям ионизации от равновесного. Когда условие $\tau_{\text{exp}} \ll \tau_{\text{ir}}$ достигается для всех ионов рассматриваемого элемента, ионизационное состояние плазмы СВ “замораживается” и в дальнейшем остается практически неизменным (“замороженным”) при движении в межпланетном пространстве.

Замораживание ионного состава СВ в короне Солнца проверяется численно путем решения системы уравнений баланса (2) с заданными профилями параметров плазмы. Интегрирование обычно продолжается до расстояний, когда плотности ионов выходят практически на предельные значения при выполнении условия $\tau_{\text{exp}} \ll \tau_{\text{ir}}$. Тем не менее, вопрос о том, насколько может меняться ионный состав СВ при дальнейшем движении в гелиосфере требует отдельного рассмотрения. Для наших целей мы ограничиваемся рассмотрением потока СВ до орбиты Земли. Примем время движения СВ от Солнца до земной орбиты $t_{\text{au}} \approx 3-4$ сут $\approx 3 \cdot 10^5$ с. Расчеты и оценки показывают, что условие $\tau_{\text{ir}} \sim t_{\text{au}}$ начинает выполняться в пределах $\approx 5-10 R_{\text{sun}}$ (R_{sun} — радиус Солнца) для ионов Fe (см., например, [23]). Для ионов O это условие удовлетворяется еще ближе, на расстояниях $\approx 1-2 R_{\text{sun}}$. Дальнейшее падение плотности плазмы в потоке СВ на 3–4 порядка при удалении от Солнца до орбиты Земли приводит к пропорциональному увеличению параметра τ_{ir} , при этом “замороженное” распределение ионов по заряду практически не меняется. Этот вывод подтверждается хорошим согласием в пределах точности метода расчетов ионного состава КВМ по параметрам плазмы в короне Солнца, с измерениями в СВ [22–24].

Следует также указать на разницу в распределениях ионов по стадиям ионизации для плазмы КВМ и ВСП в потоках СВ, которая связана с условиями нагрева в короне. Источники СВ, связанные с КВМ и часто с сопутствующими им вспышками, содержат заметное количество горячей плазмы, что проявляется в наблюдаемых “горячих” частях ионных распределений и значениях параметра $q_{12} > 0.1$. В ВСП отсутствует дополнительный нагрев выше средней температуры в короне, поэтому эти потоки демонстрируют пониженное содержание “горячих” ионов, при этом значения $q_{12} < 0.1$. Чтобы строго учесть нагрев плазмы корональными источниками в теоретических моделях, требуются сложные и трудоемкие МГД расчеты. Можно, однако, строить упрощенные полуэмпирические модели для нагрева, использующие степенные законы для температурных режимов с подбираемыми показателями степени, чтобы согласовать модельный расчет с наблюдаемыми данными (см., например, [22]).

4. СПЕКТРОСКОПИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ КВМ ПО ТЕМПЕРАТУРНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМ ДМЭ

Спектроскопическая диагностика по температурным распределениям дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) является одним из широко используемых методов для изучения солнечной плазмы на основе данных ВУФ излучения короны Солнца. Этот метод представляет собой решение обратной задачи восстановления температурной и плотностной структуры излучающей равновесной плазмы по разнотемпературным спектральным линиям или полосам (каналам) излучения. ДМЭ описывает количество плазмы вдоль луча зрения, как функцию от температуры — $DEM(T)$. Функция $DEM(T)$ связана с потоком интенсивности в канале выражением:

$$F_i = \int_T G_i(T) DEM(T) dT, \quad (3)$$

где F_i — интенсивность в i -ом канале, $G_i(T)$ — функция температурного отклика для данного канала. Существует множество алгоритмов расчета ДМЭ на основе ВУФ изображений (см., например, [29–31]). Более подробное сравнение различных методов можно найти в [32].

По восстановленной ДМЭ можно получить оценку взвешенной по ДМЭ температуры (так называемой “эффективной температуры”; см., например, [33, 34]):

$$T_{\text{em}} = \int_T T DEM(T) dT / EM, \quad (4)$$

где T — электронная температура, $EM = \int DEM(T) dT$ — полная мера эмиссии (МЭ). Оценка электронной плотности плазмы получается в предположении, что толщина (L) изучаемой структуры вдоль луча зрения равна ее видимой ширине по данным изображений (см., например, [33]). Тогда для электронной плотности получаем оценку: $N_e = \sqrt{EM/L}$.

В данной работе при восстановлении ДМЭ применялся код и алгоритм, описанный в статье [31]. В качестве исходных данных было использовано 6 ВУФ каналов телескопа *SDO/AIA* (94Å, 131Å, 171Å, 193Å, 211Å и 335Å), которые дополнительно обрабатывались при помощи стандартного набора программ из пакета SSW (Solar Soft Ware https://www.lmsal.com/solarsoft/ssw_install.html). В результате данной обработки устраняются дефектные пиксели, проводится очищение от треков загрязненных частиц и делается поправка на дрожание изображения и рассеяние света. При высокой скорости движения потока плазмы важное значение при восстановлении ДМЭ имеет компенсация сдвига рассматриваемой структуры в различ-

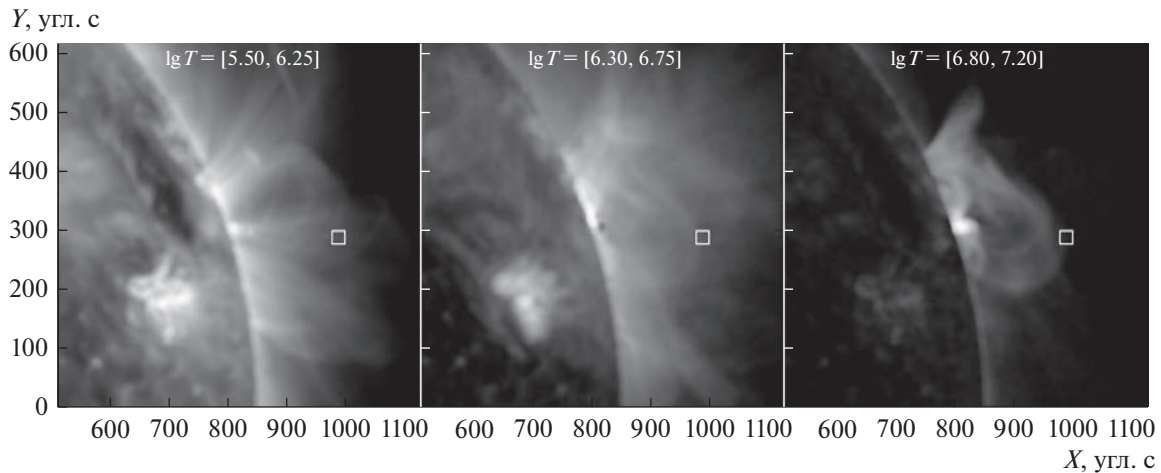


Рис. 3. Карты МЭ для трех температурных диапазонов (см. текст) в момент начала формирования КВМ (05.20). Прямоугольниками выделена область, в которой вычислялись параметры плазмы.

ных каналах [23], но в данном случае в этом нет необходимости, т.к. скорость потока была ≈ 100 км/с на высоте $1.2 R_{\text{sun}}$. При этом, различие во времени регистрации изображений в разных каналах до 12 с соответствовало их относительному сдвигу менее 1200 км, что меньше размера пикселя разрешения в ДМЭ ~ 1400 км ($1.2''$).

С помощью анализа ДМЭ было исследовано событие 18.VIII.2010 [24], во время которого в активной области АО 11093 произошел мощный КВМ, видимый с Земли на западном лимбе. Было рассчитано температурное распределение ДМЭ для области в пределах $1.15 \pm 0.02 R_{\text{sun}}$ по высоте и $73^\circ \pm 1^\circ$ по углу, что соответствует наибольшей МЭ во время развития эрупции (время 05.20; все моменты времени указаны в UT), для трех температурных диапазонов: 1) “холодного” — $\lg_{10} T = [5.5, 6.25]$, 2) “среднего” — $\lg_{10} T = [6.3, 6.75]$ и 3) “горячего” — $\lg_{10} T = [6.8, 7.2]$ (см. рис. 3 и 4). Дополнительно профили ДМЭ были получены для момента до начала выброса (04.00) и для пост-эруптивного потока (10.00) (см. рис. 4.). С помощью распределений ДМЭ для данных трех моментов времени были получены усредненные значения параметров плазмы (МЭ, электронные плотность и температура).

По сравнению с моментом до эрупции (04.00), во время выброса (05.20) величина МЭ сильно изменилась (на порядок) в “среднем” и “горячем” температурных диапазонах (см. рис. 4) из-за потока плазмы из АО и образования димминга — области пониженной яркости после ухода КВМ. В “холодном” диапазоне значение МЭ понизилось менее чем в 3 раза. Такое относительно малое падение в МЭ можно объяснить тем, что присутствовал дополнительный приток холодной плазмы за счет пересоединения между холодными петлями и открытыми силовыми линиями магнитного жгута, а также перетекания вещества холодного волокна в сторону эрупции. В период после эрупции (10.00) МЭ всех трех температурных составляющих плазмы понизилась из-за ухода вещества КВМ из солнечной короны. В дальнейшем, параметры плазмы — электронная плотность и температура (см. табл. 1), полученные путем анализа ДМЭ, были использованы при моделировании ионного состава СВ.

5. ПАРАМЕТРЫ ИОННОГО СОСТАВА Fe: РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЯ

Введенные в разделе 2 параметры q_4 , q_8 и q_{12} характеризуют относительные фракции ионов Fe

Таблица 1. Усредненные значения электронной плотности и температуры плазмы для трех моментов времени в трех температурных диапазонах

	$\lg_{10} T = [5.5, 6.25]$		$\lg_{10} T = [6.3, 6.75]$		$\lg_{10} T = [6.8, 7.2]$	
Время	$N_e (10^8), \text{см}^{-3}$	$T_{em}, \text{МК}$	$N_e (10^8), \text{см}^{-3}$	$T_{em}, \text{МК}$	$N_e (10^8), \text{см}^{-3}$	$T_{em}, \text{МК}$
04.00	1.0 ± 0.1	1.5 ± 0.4	4.8 ± 0.5	3.4 ± 0.7	3.7 ± 0.2	—
05.20	1.3 ± 0.1	1.4 ± 0.3	3.3 ± 0.2	3.6 ± 0.3	5.2 ± 1.0	10.6 ± 4.5
10.00	0.8 ± 0.1	1.4 ± 0.3	2.0 ± 0.4	3.3 ± 0.9	2.5 ± 0.6	—

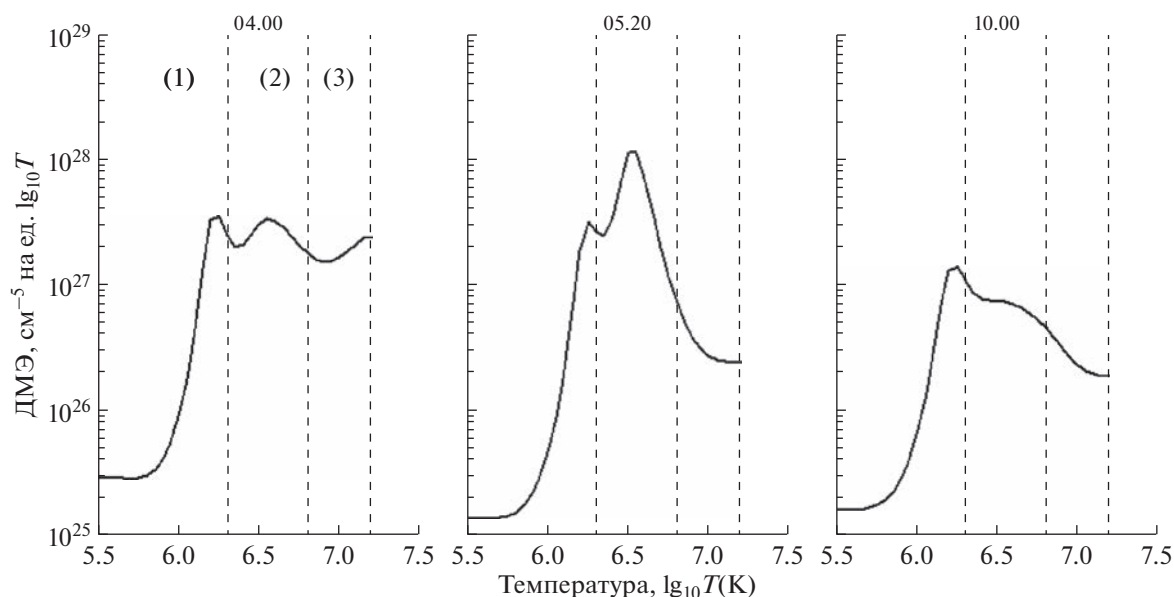


Рис. 4. Профили ДМЭ для трех моментов времени: 04.00, 05.20 и 10.00. Вертикальные пунктирные линии разделяют три температурных диапазона: (1) “холодный”, (2) “средний”, (3) “горячий”.

в их распределении по стадиям ионизации с зарядами $Z = 0-7$ (“холодная” часть), $8-11$ (“средняя”) и $12-25$ (“горячая”) и дают более детальную информацию о процессах в плазме СВ по сравнению с средним зарядом Q_{Fe} . В этом разделе мы приводим расчеты этих параметров и сравнение с измерениями. В качестве примера мы рассмотрели событие, связанное с межпланетным корональным выбросом массы (МКВМ) 18.VIII.2010 и с сопутствовавшей эрупции вспышкой C4.5 (04.45–09.30 UT) [24]. Потоки СВ, связанные с этой эрупцией, наблюдались с 20 по 25.VIII приборами STEREO-A. На основе введенных параметров q_4 , q_8 , q_{12} было выполнено моделирование зарядовое распределение ионов Fe в СВ от источника до области “замораживания” на разных стадиях эрупции и затем было проведено сравнение полученных значений с измеренными на STEREO-A.

Для анализа МКВМ, связанного с КВМ 18.VIII.2010, рассматривалось 4 временных интервала в период с 19 по 25.VIII, приведенных на рис. 26: (1) до-эруптивный поток СВ 19.VIII.2010, 00.00–20.VIII.2010, 14.00 (интервал T1), (2) эрупция, соответствующая прохождению МКВМ 20.VIII.2010, 18.00–21.VIII.2010, 12.00 (интервал T2), (3) пост-эруптивный поток СВ 21.VIII.2010, 14.00–22.VIII.2010, 20.00 (интервал T3), и (4) вернувшийся в доэруптивное состояние поток СВ 23.VIII.2010, 06.00–25.VIII.2010, 06.00 (интервал T4).

Для КВМ события 18.VIII.2010 г., связанного с рассматриваемым МКВМ, было проведено численное моделирование эволюции ионного состава Fe в плазме СВ при ее движении от источника

до области “замораживания”. Для этого решались уравнения баланса (2) с заданными профилями параметров N_e , T_e и V как функций расстояния (см. [22, 23] для деталей). Было выполнено три расчета, соответствующих начальным временам и данным из табл. 1: до эрупции 04.00 UT (далее “случай 1”), во время эрупции 05.20 UT (случай 2) и после эрупции 10.00 UT (случай 3). Скорость потока СВ, V , для всех случаев была получена из кинематических измерений. Для электронной плотности N_e мы использовали наиболее вероятную геометрию расширения плазмы СВ в корону: $N_e \sim 1/h^2$ (где h – высота над солнечной поверхностью) для случаев 1 и 3 (медленный СВ из стримеров) и $N_e \sim 1/r^3$ (где r – расстояние от центра Солнца) для случая 2 (КВМ в виде магнитного жгута). Начальные значения для температур T_e даны в табл. 1, а профиль со степенным законом подгонялся так, чтобы согласовать расчет с измерениями. Похожая процедура также использовалась в работе [18] для моделей корональной дыры и экваториального стримера. Наши расчеты показали хорошее согласие полученных плотностей и температур с результатами работы [18] для случаев 1 и 3, а также с численными МГД расчетами [35] для магнитного жгута КВМ для случая 2. Процедура, использованная для получения “замороженного” ионного состава Fe, и детали соответствующих расчетов могут быть найдены в работе [24].

На рис. 5 представлено сравнение рассчитанных относительных (нормированных на 1) распределений ионов Fe с измеренными и усреднен-

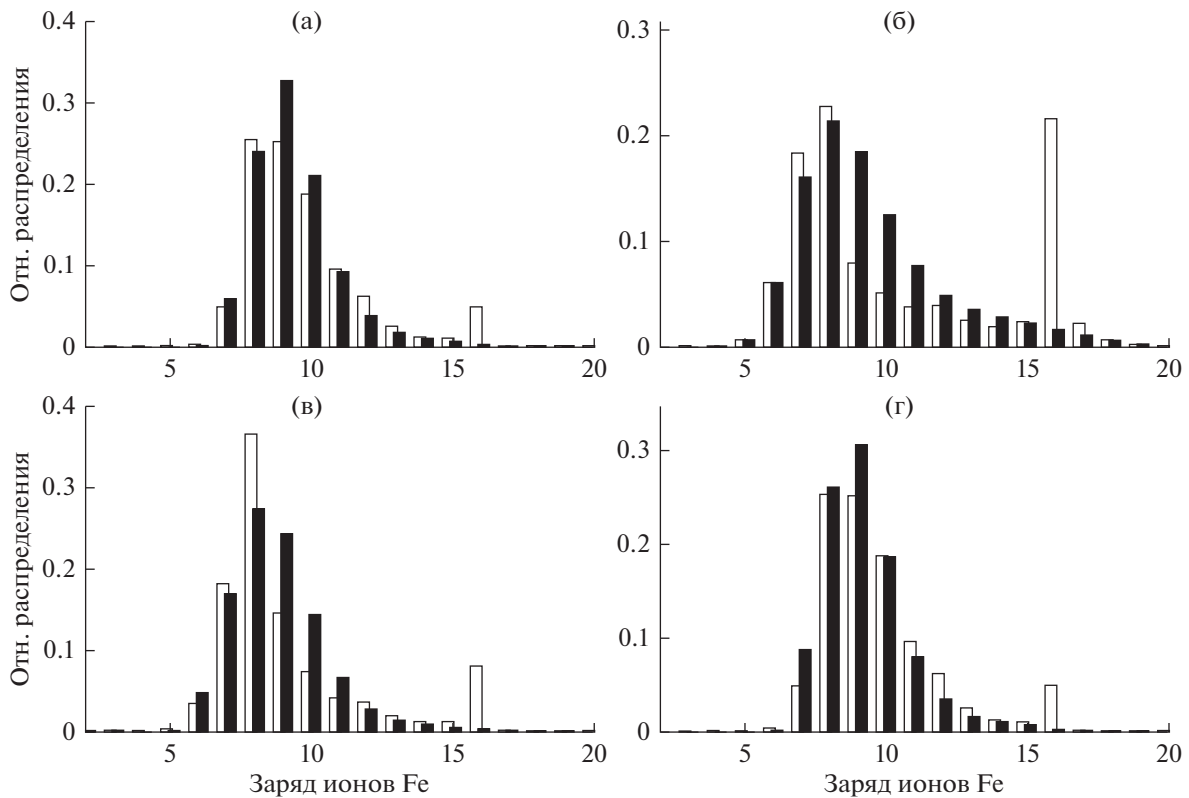


Рис. 5. Сравнение измеренных относительных распределений ионов Fe (черные столбцы), связанных с МКВМ, с модельными распределениями (белые столбцы). Расчет: (а) для случая 1 и интервала Т1; (б) для случая 2 и интервала Т2; (в) для случая 3 и интервала Т3; (г) для случая 1 и интервала Т4.

ными по интервалам Т1–Т4. Из рис. 5 видно, что модельные распределения хорошо согласуются с измеренными. Однако, следует отметить, что модельные распределения переоценивают количество ионов с большими зарядами $Z \geq 16$ для всех случаев 1–3, особенно для случая 2, связанного с МКВМ. Это, по-видимому, связано с переоценкой горячей части температурных распределений ДМЭ, восстанавливаемых по изображениям SDO/AIA. Значительное количество ионов Fe^{16+} связано с малыми скоростями рекомбинации для ионов с $Z \geq 16$ в сравнении с ионами низких зарядов (см. [25] для деталей).

Из модельных и измеренных распределений были получены параметры q_4 , q_8 и q_{12} , усреднен-

ные по временным интервалам Т1–Т4, которые приводятся в табл. 2. Сравнение показывает, что рассчитанные параметры q_4 и q_8 хорошо согласуются с измеренными в пределах ошибок измерений, тогда как модельные значения q_{12} переоценены примерно в 2 раза по указанной выше причине, связанной с горячей частью ДМЭ. Рис. 6, на котором представлены измеренные и модельные значения параметров q_4 , q_8 и q_{12} , также демонстрирует эти выводы.

Кроме того, моделирование позволяет дать возможную интерпретацию заметной разницы в параметрах q_4 и q_{12} для интервалов Т1 (до-эруптивный поток СВ) и Т3 (пост-эруптивный поток СВ). Модельный расчет показал, что интервалу Т1 по-

Таблица 2. Измеренные зарядовые параметры q_4 , q_8 и q_{12} и их расчетные значения, усредненные по интервалам Т1–Т4

Интервал времени	q_4		q_8		q_{12}	
	измерение	расчет	измерение	расчет	измерение	расчет
Т1	0.059 ± 0.020	0.053 ± 0.013	0.864 ± 0.207	0.789 ± 0.094	0.077 ± 0.041	0.158 ± 0.107
Т2	0.229 ± 0.035	0.250 ± 0.112	0.600 ± 0.083	0.395 ± 0.019	0.171 ± 0.040	0.354 ± 0.130
Т3	0.217 ± 0.049	0.218 ± 0.016	0.722 ± 0.144	0.623 ± 0.095	0.061 ± 0.028	0.159 ± 0.111
Т4	0.089 ± 0.028	—	0.836 ± 0.199	—	0.074 ± 0.038	—

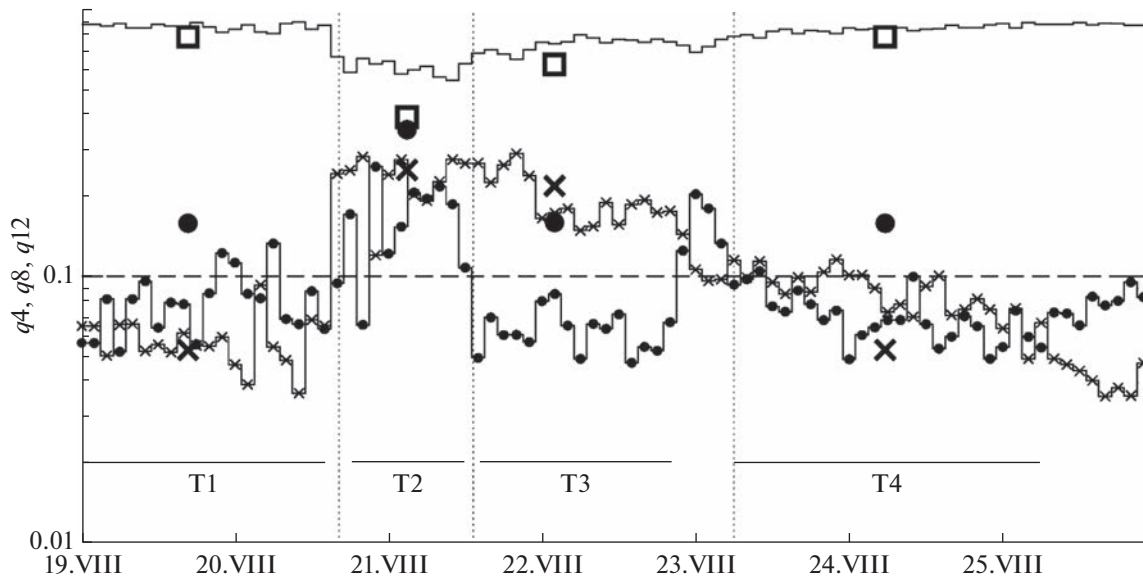


Рис. 6. Измеренные временные профили параметров $q4$ (линия и маленькие крестики), $q8$ (сплошная линия) и $q12$ (линия и маленькие кружки) для события, связанного с МКВМ 19.VIII–25.VIII.2010. Рассчитанные значения параметров соответствуют данным из табл. 2: параметр $q4$ – большие крестики, $q8$ – квадраты, $q12$ – большие кружки.

сле замораживания ионного состава соответствовала температура $T_e \approx 1$ МК, что типично для медленного СВ, тогда как для интервала Т3 (пост-эруптивное состояние) $T_e \approx 0.5$ МК. Преобладание в последнем случае “холодной” плазмы можно объяснить не только падением плотности “горячей” плазмы после эрупции, но также и отсутствием нагрева после окончания вспышки.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены особенности формирования зарядового распределения ионов Fe в различных типах потоков СВ с помощью введения относительных параметров зарядового состояния $q4$, $q8$ и $q12$, отвечающих “холодной”, “средней” и “горячей” частям распределения. Анализ данных СВ, зарегистрированных приборами КА *STEREO-A* в 2010 г. показывает, что временные профили этих параметров в крупномасштабных потоках СВ различного типа существенно отличаются. В областях МСВ $q4$ и $q12$ близки: $\langle q4 \rangle = 0.081$, $\langle q12 \rangle = 0.085$ при среднем значении их отношения $\langle q4/q12 \rangle = 1.44$, что соответствует максимуму распределения потока всего СВ за период 2010 г. В участках ВСП наблюдается сильное расхождение $q4$ и $q12$: $\langle q4 \rangle = 0.21$, $\langle q12 \rangle = 0.055$, среднее значение их отношения $\langle q4/q12 \rangle = 4.86$. В МКВМ $\langle q4 \rangle$ и $\langle q12 \rangle$ примерно одинаковы (0.134 и 0.138), среднее значение их отношения $\langle q4/q12 \rangle = 1.44$, однако в пределах конкретных событий наблюдаются значительные вариации параметров в ту и другую сторону, что, возможно, связано с формированием потока из нескольких частей с разной температурой. Кор-

реляция между параметрами $q4$ и $q12$ отсутствует или слабо отрицательна, что может быть объяснено двумя причинами: неравновесностью состояния плазменных потоков в области заморозания из-за различия в скоростях рекомбинации ионов с разными зарядами и/или формированием этих потоков из нескольких источников с разной температурой [24].

В работе также рассмотрены принципы численного моделирования зарядового распределения ионов Fe в плазме ВСП и МКВМ на основе решения уравнений баланса для плотностей ионов с разными зарядами, которые изменяются в процессе рекомбинации и ионизации в типичных условиях ускорения и нагрева плазмы СВ при ее движении в короне. В качестве исходных данных используются электронные температура и плотность, которые определяются с помощью анализа температурных распределений ДМЭ, восстанавливаемой по ВУФ-изображениям телескопа *SDO/AIA*. В качестве примера, для КВМ события 18.VIII.2010 было проведено восстановление распределений ДМЭ, численное моделирование эволюции ионного состава Fe от источника до области “замораживания” и расчет средних значений параметров $q4$, $q8$ и $q12$ зарядового распределения в СВ для разных стадий эрупции: до прихода эруптивного потока, в МКВМ и после эрупции. Сравнение модельных распределений ионов Fe с измеренными показало хорошее согласие в пределах ошибок. Отмечено превышение в расчете доли ионов с зарядами $Z \geq 16$ примерно в 2 раза по сравнению с данными измерений, особенно в интервале, связанном с МКВМ.

Это, по-видимому, связано с переоценкой высокотемпературной части ДМЭ из-за недостаточной точности температурных откликов каналов *SDO/AIA* при температурах более 10 МК.

Моделирование параметров зарядового состояния ионов Fe в потоках плазмы позволяет идентифицировать источники потоков СВ и понять термодинамику их формирования, что важно для развития методов решения задач прогнозирования параметров СВ по данным солнечных наблюдений.

Авторы благодарят коллективы *STEREO/PLASTIC* и *SDO/AIA* за политику открытых данных. Эксперимент *PLASTIC* является совместным проектом США, Швейцарии и ФРГ с участием Университета г. Нью Гэмпшир, Университета г. Берн, Института Макса-Планка внеземной физики, Кристиан-Альбрехт Университета г. Киль, НАСА (Центр космических полетов Годдард), Калифорнийского Университета г. Беркли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gringauz K.I.* The structure of the ionized gas envelope of Earth from direct measurements in the USSR of local charged particle concentrations // *Planetary and Space Science*. 1963. V. 11. P. 281–296. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(63\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(63)90030-8)
2. *Snyder C.W., Neugebauer M.* Interplanetary solar-wind measurements by Mariner II. Space Research Conference, 1964.
3. *Schwenn R.* Large-Scale Structure of the Interplanetary Medium / Eds.: Schwenn R., Marsch E. // *Physics of the Inner Heliosphere I*, XI Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990. P. 99. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75361-9_3
4. *McComas D.J., Barraclough B.L., Funsten H.O. et al.* Solar wind observations over Ulysses' first full polar orbit // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 10419. <https://doi.org/10.1029/1999JA000383>
5. *McComas D.J., Goldstein R., Gosling J.T., Skoug R.M.* Ulysses' Second Orbit: Remarkably Different Solar Wind // *Space Sci. Rev.* 2001. V. 97. P. 99. <https://doi.org/10.1023/A:1011826111330>
6. *Wang Y.-M., Sheely N.R., Jr.* Sources of the Solar Wind at Ulysses during 1990–2006 // *Astrophys. J.* 2006. V. 653. P. 708. <https://doi.org/10.1086/508929>
7. *von Steiger R., Schwadron N.A., Fisk L.A. et al.* Composition of quasi-stationary solar wind flows from Ulysses/Solar Wind Ion Composition Spectrometer // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. P. 27217. <https://doi.org/10.1029/1999JA000358>
8. *Richardson I.G.* Identification of Interplanetary Coronal Mass Ejections at Ulysses Using Multiple Solar Wind Signatures // *Solar Phys.* 2014. V. 289. P. 3843. <https://doi.org/10.1007/s11207-014-0540-8>
9. *Gloeckler G., Cain J., Ipavich F.M. et al.* Investigation of the composition of solar and interstellar matter using solar wind and pickup ion measurements with SWICS and SWIMS on the ACE spacecraft // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 86. P. 497. <https://doi.org/10.1023/A:1005036131689>
10. *Galvin A.B., Kistler L.M., Popecki M.A. et al.* The Plasma and Suprathermal Ion Composition (PLASTIC) Investigation on the STEREO Observatories // *Space Sci. Rev.* 2008. V. 136. P. 437. <https://doi.org/10.1007/s11214-007-9296-x>
11. *Perrone D., Bruno R., D'Amicis R. et al.* Coherent Events at Ion Scales in the Inner Heliosphere: Parker Solar Probe Observations during the First Encounter // *Astrophysical Journal*. 2020. V. 905:142. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc480>
12. *Mason G.M., Ho G.C., Allen R.C. et al.* Quiet-time low energy ion spectra observed on Solar Orbiter during solar minimum // *Astronomy & Astrophysics*. 2021. V. 656. Article id. L5. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140540>
13. *Hundhausen A.J., Gilbert H.E., Bame S.J.* Ionization state of the interplanetary plasma // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73. P. 5485. <https://doi.org/10.1029/JA073i017p05485>
14. *Owocki S.P., Holzer T.E., Hundhausen A.J.* The solar wind ionization state as a coronal temperature diagnostic // *Astrophysical J.* 1983. V. 275. P. 354–366. <https://doi.org/10.1086/161538>
15. *Zurbuchen T.H., Richardson I.G.* In-situ solar wind magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections // *Space Science Reviews*. 2006. V. 123. P. 31–43. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9010-4>
16. *Landi E., Gruesbeck J.R., Lepri S.T. et al.* Charge State Evolution in the Solar Wind. II. Plasma Charge State Composition in the Inner Corona and Accelerating Fast Solar Wind // *Astrophysical J.* 2012. V. 761. Is. 1. Article id. 48. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/761/1/48>
17. *Landi E., Gruesbeck J.R., Lepri S.T. et al.* Charge State Evolution in the Solar Wind. Radiative Losses in Fast Solar Wind Plasmas // *Astrophysical J.* 2012. V. 758. Is. 1. Article id. L21. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/758/1/L21>
18. *Landi E., Gruesbeck J.R., Lepri S.T., Zurbuchen T.H.* New Solar Wind Diagnostic Using Both in Situ and Spectroscopic Measurements // *Astrophysical J.* 2012. V. 750. Is. 2. Article id. 159. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/750/2/159>
19. *Landi E., Alexander R.L., Gruesbeck J.R. et al.* Carbon Ionization Stages as a Diagnostic of the Solar Wind // *Astrophysical J.* 2012. V. 744. № 2. Article id. 100. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/744/2/100>
20. *Gruesbeck J.R., Lepri S.T., Zurbuchen T.H., Antiochos S.K.* Constraints on Coronal Mass Ejection Evolution from in Situ Observations of Ionic Charge States // *Astrophysical J.* 2011. V. 730. № 2. Article id. 103. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/730/2/103>
21. *Lepri S.T., Laming J.M., Rakowski C.E., von Steiger R.* Spatially Dependent Heating and Ionization in an ICME Observed by Both ACE and Ulysses // *Astrophysical J.* V. 760. Is. 2. Article id. 105. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/2/105>
22. *Rodkin D., Goryaev F., Pagano P. et al.* Origin and Ion Charge State Evolution of Solar Wind Transients

- during 4–7 August 2011 // *Solar Physics*. 2017. V. 292. № 7. Article id. 90.
<https://doi.org/10.1007/s11207-017-1109-0>
23. Grechnev V.V., Kochanov A.A., Uralov A.M. *et al.* Development of a Fast CME and Properties of a Related Interplanetary Transient // *Solar Physics*. 2019. V. 294. Article id. 139.
<https://doi.org/10.1007/s11207-019-1529-0>
 24. Slemzin V., Goryaev F., Rodkin D. Formation of Coronal Mass Ejection and Posteruption Flow of Solar Wind on 2010 August 18 Event // *Astrophysical J.* 2022. V. 929. Id. 146.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac5901>
 25. Goryaev F., Slemzin V., Rodkin D. Identification of Hot Plasma Anomalies in Solar Wind Using Fe Ion Charge Distributions // *Astrophysical J. Lett.* 2020. V. 905. Is. 2. Article id. L17.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/abcc76>
 26. Lopez R.E. Solar cycle invariance in solar wind proton temperature relationships // *J. Geophys. Res.* 1987. V. 92. P. 11189–11194.
<https://doi.org/10.1029/JA092iA10p11189>
 27. Richardson I.G., Cane H.V. Identification of interplanetary coronal mass ejections at 1 AU using multiple solar wind plasma composition anomalies // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A09104.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010598>
 28. Ko Y.-K., Fisk L.A., Geiss J. *et al.* An empirical study of the electron temperature and heavy ion velocities in the south polar coronal hole // *Solar Physics*. 1997. V. 171. P. 345–361.
<https://doi.org/10.1023/A:1004943213433>
 29. Hannah I.G., Kontar E.P. Differential emission measures from the regularized inversion of Hinode and SDO data // *Astronomy&Astrophysics*. 2012. V. 539. Article id. A146.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117576>
 30. Plowman J., Kankelborg C., Martens P. Fast Differential Emission Measure Inversion of Solar Coronal Data // *Astrophysical J.* 2013. V. 771. № 1. Article id. 2.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/771/1/2>
 31. Plowman J., Caspi A. A Fast, Simple, Robust Algorithm for Coronal Temperature Reconstruction // *Astrophysical J.* 2020. V. 905. № 1. Article id. 17.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/abc260>
 32. Aschwanden M.J., Boerner P., Caspi A. *et al.* Benchmark Test of Differential Emission Measure Codes and Multi-thermal Energies in Solar Active Regions // *Solar Physics*. 2015. V. 290. P. 2733–2763.
<https://doi.org/10.1007/s11207-015-0790-0>
 33. Cheng X., Zhang J., Saar S.H. *et al.* Differential Emission Measure Analysis of Multiple Structural Components of Coronal Mass Ejections in the Inner Corona // *Astrophysical J.* 2012. V. 761. № 1. Article id. 62.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/761/1/62>
 34. Saqri J., Veronig A.M., Heinemann S.G. *et al.* Differential Emission Measure Plasma Diagnostics of a Long-Lived Coronal Hole // *Solar Physics*. 2020. V. 295. № 1. Article id. 6.
<https://doi.org/10.1007/s11207-019-1570-z>
 35. Lynch B.J., Reinard A.A., Mulligan T. *et al.* Ionic Composition Structure of Coronal Mass Ejections in Axisymmetric Magnetohydrodynamic Models // *Astrophysical J.* 2011. V. 740. № 2. Article id. 112.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/740/2/112>

УДК 523-62523.9

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ С ЖЕСТКОСТЬЮ ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ШИРОТЫ

© 2023 г. О. А. Данилова¹, *, Н. Г. Птицына¹, М. И. Тясто¹, В. Е. Сдобнов²¹Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Санкт-Петербург, Россия²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

*md1555@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.

После доработки 07.05.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

Мы изучили особенности широтного поведения геомагнитных порогов космических лучей R , а также их чувствительности к параметрам межпланетной среды и магнитосферы во время трех фаз магнитной бури 7–8.IX.2017 — в начальной, главной и восстановительной фазах. Для этого R были рассчитаны двумя разными способами — методом спектрографической глобальной съемки ($R_{\text{сгс}}$) и методом прослеживания траекторий частиц космических лучей (КЛ) в модельном магнитном поле ($R_{\text{эф}}$). Максимальное понижение порогов наблюдается в максимуме бури ($Dst = -142$ нТл), достигая значений $\Delta R_{\text{сгс}} = -0.52$ ГВ и $\Delta R_{\text{эф}} = -0.66$ ГВ. Кривая вариаций $\Delta R_{\text{сгс}}$ в зависимости от жесткости обрезания станции наблюдения (широты) принимает классическую форму с максимумом падения порогов на среднеширотных станциях. Наиболее сильно ΔR коррелирует с Dst -индексом, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в зависимости вариаций жесткостей обрезания КЛ. Также видно значительное влияние на $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ скорости солнечного ветра V и параметров межпланетного магнитного поля (ММП). На главной фазе $\Delta R_{\text{эф}}$ зависит от B и B_z ММП, а $\Delta R_{\text{сгс}}$ — от B и B_y . Для $\Delta R_{\text{сгс}}$ корреляция с электромагнитными параметрами изменяется в зависимости от станции наблюдения регулярным образом. Для $\Delta R_{\text{эф}}$ такой тенденции не наблюдается.

DOI: 10.31857/S0023420623010028, EDN: FHYHNE

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитная жесткость R (момент на единицу заряда) характеризует способность частиц космических лучей (КЛ) проникать в магнитосферу. Геомагнитный порог или жесткость геомагнитного обрезания (ЖГО) — это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из-за экранирования магнитного поля Земли [1, 2]. В результате геомагнитного обрезания возникают широтные эффекты. Взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра (СВ) с магнитосферными полями и токами приводит во время магнитных бурь к значительным изменениям порогов (ΔR).

Знание широтных зависимостей ΔR от параметров солнечного ветра и магнитосферы может прояснить некоторые черты взаимодействия системы “солнечный ветер — магнитосфера” и сопутствующие этому взаимодействию геомагнитные эффекты, которые управляют транспортировкой КЛ через магнитосферу и атмосферу во время возмущений. Кроме теоретического значе-

ния, это важно для обеспечения безопасности экипажа и пассажиров космических полетов, а также высокоширотной и высотной авиации [2–4]. Учет последствий плохой космической погоды становится еще более актуальным в свете современной тенденции развивать орбитальные скоростные межконтинентальные перелеты между любыми точками на Земле [5].

Долготные и широтные зависимости вариаций жесткостей обрезания в спокойные периоды и во время отдельных магнитных бурь рассматривались в ряде статей [1, 6–9]. Однако широтные зависимости чувствительности геомагнитных порогов к различным параметрам магнитосферы оставались за рамками этих исследований.

Энергию солнечного ветра в магнитосферу Земли во время магнитной бури передают выбросы корональной солнечной массы (СМЕ) или высокоскоростные коротирующие области возмущений (CIR) из корональных дыр. Поступление энергии, генерированной во время повышенной активности Солнца, и ее последующее затухание

в магнитосфере определяет различные этапы развития геомагнитной бури [10]. Целью данного исследования является определение геомагнитных порогов в период сильной геомагнитной бури 7–8.IX.2017, а также анализ зависимости их изменений от параметров межпланетной среды и геомагнитосферы при помощи расчета соответствующих корреляций. Особое внимание мы уделили анализу корреляций изменений геомагнитных порогов с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время различных фаз развития анализируемой бури, имея в виду, что этот вопрос недостаточно изучен. При этом фокус данной работы был на широтных эффектах.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Мы оценили связь вариаций жесткости геомагнитного обрезания ΔR с изменением параметров гелио- и геомагнитосферы в период времени 7–8.IX.2017. Для этого мы рассчитали ΔR двумя способами.

При использовании первого способа вертикальные эффективные геомагнитные пороги (или жесткости геомагнитного обрезания) $R_{\text{эф}}$ были получены методом численного интегрирования траекторий заряженных частиц в модельном магнитном поле Земли [11]. В качестве модели выбрана полуэмпирическая модель магнитосферы $Ts01$ [12, 13]. В $Ts01$ в качестве входных параметров используются данные о солнечном ветре и геомагнитной активности из базы данных OMNI (Geopack-2008, <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/modeling.html>). Вычисленные таким образом изменения геомагнитных порогов $\Delta R_{\text{эф}}$ далее называем *модельными*.

Второй способ определения ΔR был метод спектрографической глобальной съемки (СГС), при котором определение ЖГО ($R_{\text{сгс}}$) базируется на наблюдательных данных сети нейтронных мониторов [14]. Этот метод позволяет по наземным наблюдениям КЛ на мировой сети станций получать информацию о распределении первичных КЛ по энергиям и пич-углам в ММП, а также об изменениях планетарной системы жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений. Вариации $\Delta R_{\text{сгс}}$ далее в статье называются *наблюдательными*.

Расчеты проводились для каждого часа в период 7–8.IX.2017 для станций, расположенных на разных широтах: обсерватория Emilio Segre в Израиле (ESOI) (33°.30 N, 35°.80 E), Алматы (43°.20 N, 76°.94 E), Рим (41°.90 N, 12°.52 E), Иркутск (52°.47 N, 104°.03 E), Москва (55°.47 N, 37°.32 E) и

Кингстон (42°.99 S, 147°.29 E). Станции выбирались таким образом, чтобы в спокойное время они охватывали основную область пороговых жесткостей R_c , подверженных влиянию геомагнитного поля от ~11 ГВ (ESOI) до ~2 ГВ (Кингстон). Пороговые жесткости станций в спокойный период R_c рассчитывали, как среднее за спокойные сутки 6 ноября 2004 г. Затем вычислялись коэффициенты корреляции k вариаций жесткостей обрезания $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ с параметрами СВ, ММП и геомагнитной активности для перечисленных станций. Коэффициенты k получались из анализа регрессионных уравнений отдельно по выборкам наблюдений для каждой из трех фаз бури.

3. ДАННЫЕ

Данные о космических лучах для вычисления $R_{\text{сгс}}$ получены по результатам наблюдений, проведенных на оборудовании Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> и на уникальной научной установке “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)” <https://ckp-rf.ru/usu/433536/>.

Для вычисления $R_{\text{эф}}$ и корреляций использовались данные о часовых значениях параметров солнечного ветра (плотность N , скорость V , давление P), ММП (полное поле B , компоненты B_z и B_y), а также об азимутальной компоненте электрического поля E_y и индексах геомагнитной активности (Kp и Dst) из базы OMNI на сайте <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Заметим, что данные OMNI не измеряются *in situ* около головной ударной волны каким-либо физически существующим космическим аппаратом (КА). Эти данные составлены из измерений ряда КА, находящихся в СВ около точки Лагранжа L1 (напр., *Wind*, *ACE*, *DISCOVER*). Эти измерения в СВ сдвигаются по времени от точки нахождения КА до головной ударной волны с учетом скорости конвекции СВ [15].

Данные о Dst поступают в базу OMNI из World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, а о Kp — из Helmholtz-Centre, Potsdam (GFZ, German Research Centre for Geosciences), где они рассчитываются по 13-ти станциям.

На рис. 1 показаны изменения параметров солнечного ветра, ММП и геомагнитной активности во время исследуемой магнитной бури с 11.00 UT 7.IX.2017 до 11.00 UT 8.IX.2017. Эта буря была связана с активной областью AR 12763, которая продемонстрировала в предыдущие дни очень высокий уровень вспышек и корональных

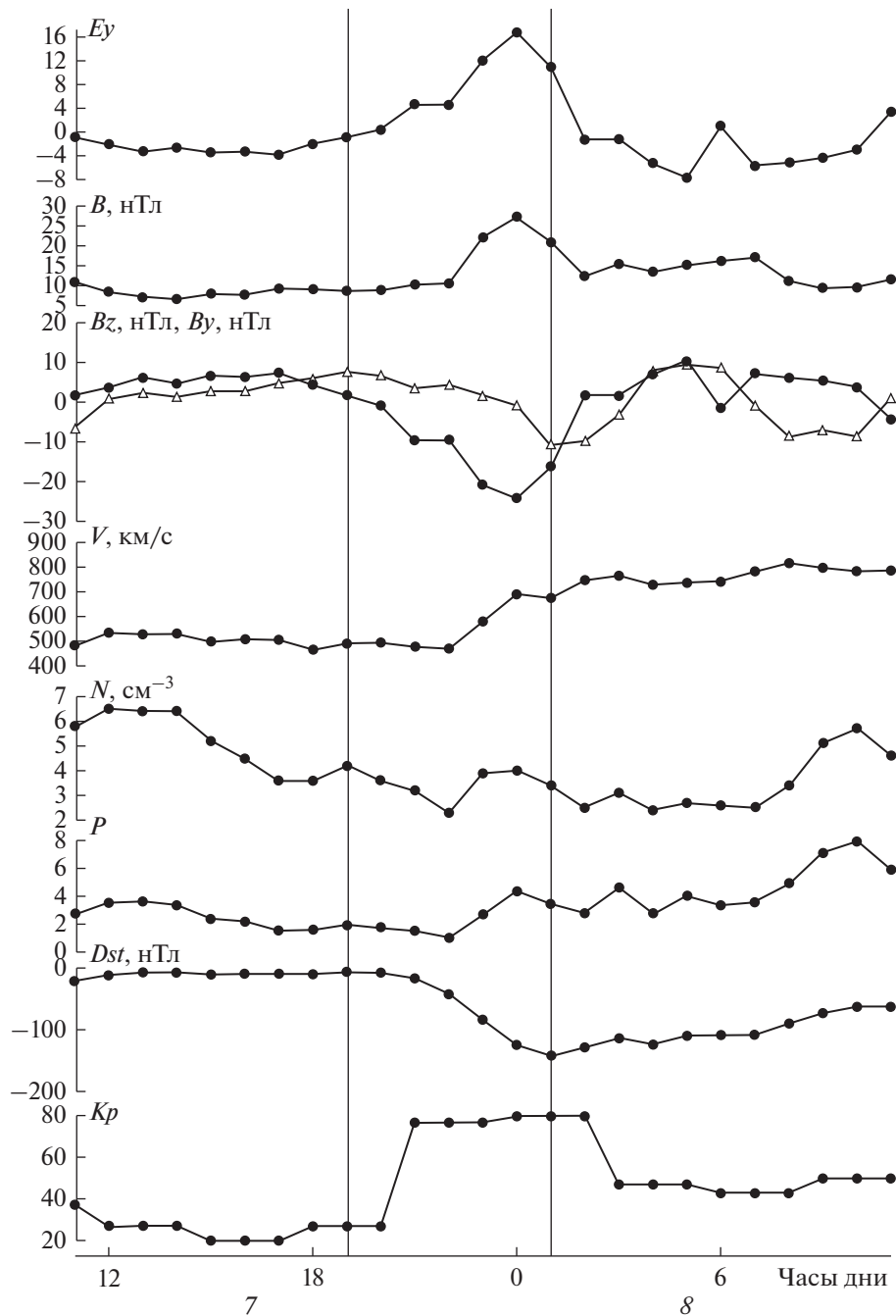


Рис. 1. Изменение параметров солнечного ветра и геомагнитного поля 7–8.IX.2017. Сверху вниз: E_y компонента электрического поля; компоненты ММП: B_z , B_y ; скорость V солнечного ветра; плотность N и динамическое давление P ; индексы геомагнитной активности Dst и $Kp \cdot 10$. Вертикальными линиями отмечена главная фаза бури.

выбросов массы (CME) [16]. Эти CME, связанные с ними ударные волны, магнитные “поршни” и магнитные облака были ответственны за два геомагнитных возмущения, наблюдавшиеся 7–9.IX.2017 [16, 17]. В частности, 7.IX.2017 около 20.00 UT, было зарегистрировано магнитное облако, которое и было ответственно за возникновение и развитие исследуемой бури 7–8.IX.2017

[16, 17]. В это время произошел поворот к югу B_z -компоненты, которая достигла $B_z = -24.2$ нТл в 01.00 UT. В 19.00 UT наблюдался небольшой скачок Dst , после которого началось понижение Dst до -142 нТл в 01.00 UT 8.IX.2017. Это определило главную фазу бури. После 01.00 UT началось восстановление Dst . Однако в 11.00 UT (максимальное $Dst = -63$ нТл) восстановление было прерва-

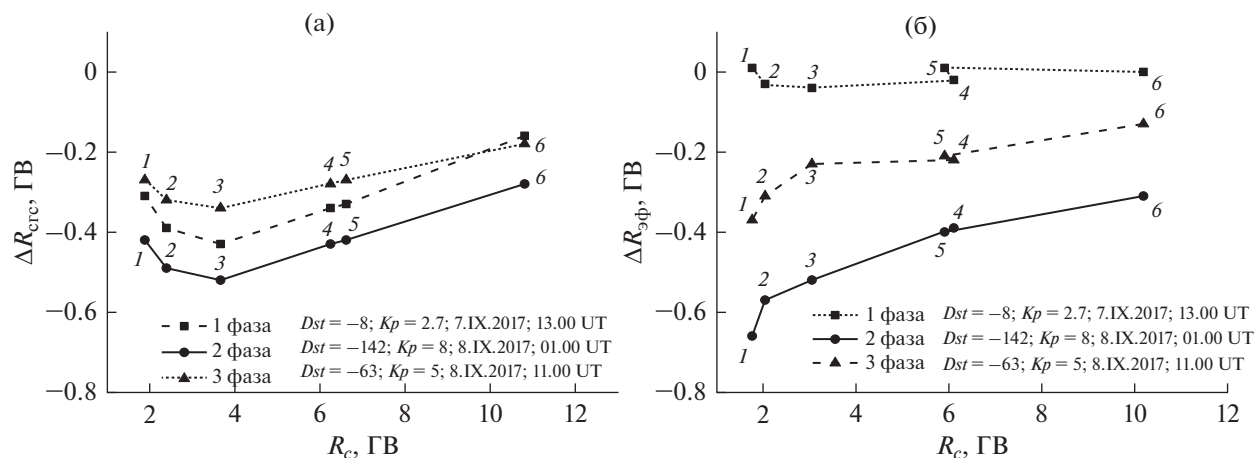


Рис. 2. Изменения геомагнитных порогов $\Delta R_{сгс}$ (а) и $\Delta R_{эф}$ (б) в зависимости от пороговой жесткости станции R_c для различных фаз бури: квадраты — начальная фаза, кружки — главная, треугольники — восстановительная фазы.

но приходом следующего межпланетного возмущения и началом второй несколько меньшей магнитной бури (не показана здесь).

Предварительная фаза магнитной бури характеризуется незначительными колебаниями геомагнитной активности, более заметными в районе высоких широт [10]. На рис. 1 видно, что в промежуток времени 11.00–18.00 UT 7.IX индекс Dst (определяемый по низкоширотным станциям) меняется очень мало, а Kp (определяемый по станциям на более высоких широтах, $\sim 40^\circ$ – 60°) демонстрирует несколько большие колебания. Поэтому мы рассматривали этот промежуток времени как предварительную фазу геомагнитной бури.

В итоге, фазы развития бури 7–8.IX.2017 определены следующим образом: первая фаза (предварительная) — 11.00 UT–18.00 UT, 7.IX.2017, вторая фаза (главная) — 19.00 UT 7.IX.2017–01.00 UT 8.IX.2017, третья фаза (восстановительная) — 02.00 UT–11.00 UT 8.IX.2017.

4. ШИРОТНЫЕ КРИВЫЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАЗ БУРИ

На рис. 2 приведены примеры широтного поведения вариаций геомагнитных порогов $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$ в зависимости от пороговых жесткостей R_c выбранных станций для нескольких моментов времени в течение бури. Видно, что максимальное понижение порогов наблюдается на главной фазе ($Dst = -142$ нТл), достигая значений $\Delta R_{сгс} = -0.52$ ГВ и $\Delta R_{эф} = -0.66$ ГВ.

Широтная кривая $\Delta R_{сгс}$ на всех фазах демонстрирует типичную форму такой кривой с максимумом падения жесткости обрезания на средне-

широтных (3–4 ГВ) станциях [1, 6, 8, 14]. В данном случае максимум падения кривой приходится на $R_c = 3.66$ ГВ (ст. Иркутск). Это говорит о том, что распределение наблюдательных значений $\Delta R_{сгс}$ достаточно хорошо отражает конфигурацию магнитосферы во время активности бури.

Модельные значения $\Delta R_{эф}$ не показывают такой типичной зависимости, на главной и восстановительной фазах, они возрастают с возрастанием значений R_c . Видно, что для жесткостей > 3 ГВ модельные кривые $\Delta R_{эф}$ на главной фазе демонстрируют хорошее согласие с наблюдательными кривыми $\Delta R_{сгс}$. Причем, если в области малых жесткостей станций КЛ понижение $\Delta R_{эф}$ больше, чем $\Delta R_{сгс}$, то в области более высоких жесткостей понижения практически совпадают, меняясь от -0.3 до -0.5 ГВ. На восстановительной фазе $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ ведут себя приблизительно так же, как и на главной фазе, с той разницей, что падение наблюдательных порогов на всей кривой меньше, чем модельных.

5. ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОРОГОВ И ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОСФЕРЫ

В этом параграфе мы проанализировали связь между жесткостями обрезания и исследуемыми параметрами электромагнитного поля, солнечного ветра и геомагнитной активности для каждой из шести разноширотных станций КЛ. Коэффициенты корреляции k представлены в виде диаграмм (рис. 3) для всей бури (а, б), главной (в, г) и восстановительной (д, е) фаз. Кроме того, последний столбик K отражает коэффициент корреляции между $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$. Эти рисунки показыва-

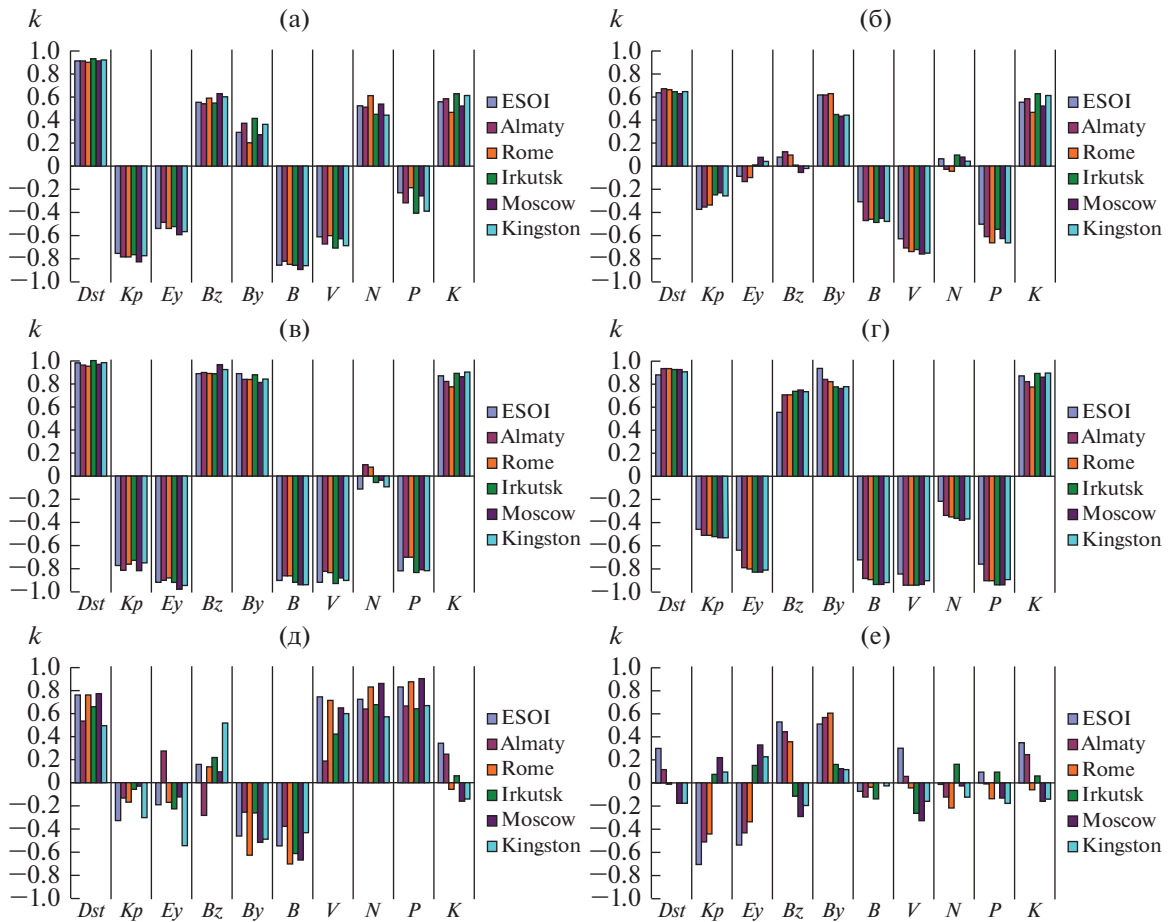


Рис. 3. Корреляция параметров солнечного ветра и геомагнитной активности с $\Delta R_{\text{эф}}$ (а, в, д) и $\Delta R_{\text{сгс}}$ (б, г, е) для 6 разноширотных станций КЛ для всего периода бури 7–8.IX.2017 – а, б; и ее двух фаз: главной – в, г; восстановительной – д, е.

ют эволюцию отклика ЖГО на изменения исследуемых параметров на каждой станции.

Из рис. 3а–3г видно, что на масштабе всей бури и ее главной фазы связь с исследуемыми параметрами модельных порогов сильнее, чем наблюдательных. Наиболее сильная связь $\Delta R_{\text{эф}}$ ($0.8-0.9 \pm 0.05$) наблюдается с Dst , для $\Delta R_{\text{сгс}}$ она чуть ниже — ($0.6-0.7 \pm 0.09$). И только на восстановительной фазе для $\Delta R_{\text{сгс}}$ k падает до незначительных значений <0.4 . На всем протяжении бури видна также значительная антикорреляция $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ со скоростью солнечного ветра V . Можно отметить также довольно существенную зависимость от магнитных параметров как модельных значений $\Delta R_{\text{эф}}$, так и наблюдательных $\Delta R_{\text{сгс}}$. В $\Delta R_{\text{эф}}$ вносит основной вклад пара B ($k \approx -0.85 \pm 0.08$) и Bz ($k \approx 0.6 \pm 0.1$), а в $\Delta R_{\text{сгс}}$ — B ($\approx -0.5 \pm 0.15$) и By ($\approx 0.5 \pm 0.15$).

Рис. 3а, 3б демонстрирует тот факт, что для $\Delta R_{\text{эф}}$ корреляция со всеми параметрами не пока-

зывает четкой зависимости от станции наблюдения, т.е. от широты. В то время как для $\Delta R_{\text{сгс}}$ эта зависимость наблюдается для некоторых параметров: связь $\Delta R_{\text{сгс}}$ с By максимальна для низких широт ($k \approx 0.65 \pm 0.1$) и минимальна для высоких ($k \approx 0.45 \pm 0.2$), а связь $\Delta R_{\text{сгс}}$ с V , напротив, минимальна для низких широт ($k \approx -0.65 \pm 0.1$) и максимальна для высоких ($k \approx -0.75 \pm 0.15$).

На главной фазе (рис. 3в, 3г) корреляция очень высокая, и достигает значений 0.95 практически для всех параметров солнечного ветра и магнитосферы как для $\Delta R_{\text{эф}}$, так и для $\Delta R_{\text{сгс}}$. Исключение составляет лишь плотность солнечного ветра (N), которая не оказывает практически никакого влияния на геомагнитные пороги. Здесь, как и для всей бури, корреляция параметров СВ и магнитосферы с $\Delta R_{\text{эф}}$ не показывают сколько-нибудь четкой картины зависимости от широты станции КЛ. Напротив, корреляция $\Delta R_{\text{сгс}}$ с электромагнитными параметрами Ey , B , Bz , By показывает явную тенденцию зависимости от широты.

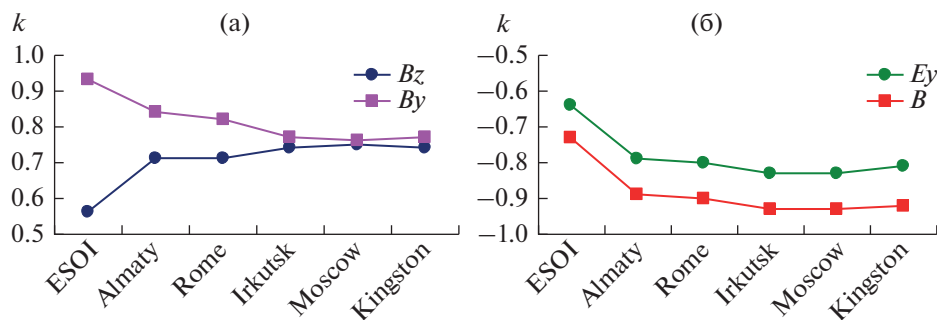


Рис. 4. Широтная зависимость коэффициентов корреляции k между $\Delta R_{\text{сгс}}$ и параметрами ММП для главной фазы.

На восстановительной фазе из рис. 3д, 3е видно, что наибольшая корреляция $\Delta R_{\text{эф}}$ отмечается с Dst и динамическими параметрами солнечного ветра V , N и P . Влияние B и B_y несколько меньше, а влияние B_z фактически отсутствует. Следует отметить, что на восстановительной фазе связь порогов и параметров солнечного ветра и магнитосферы показывает некоторую зависимость от широты, однако эта связь не носит регулярного характера, она хаотична. Что касается $\Delta R_{\text{сгс}}$, то в это время отсутствует связь с Dst . На этой фазе контроль $\Delta R_{\text{сгс}}$ геомагнитной активностью осуществляется через Kp индекс. Видно, что исследуемые параметры вносят гораздо меньший вклад в понижение наблюдательных порогов и по сравнению с $\Delta R_{\text{эф}}$, и по сравнению с тем, каков был этот вклад на главной фазе. Коэффициент корреляции превышает 0.5 лишь для некоторых параметров и для некоторых станций, например для связи с P (Москва), а также с Kp , E_y и B_z на низкоширотной станции ESOI. Однако, как и для $\Delta R_{\text{эф}}$, зависимость от широты не демонстрирует какой-либо определенной тенденции, она хаотична. Отсутствие регулярных связей, хаотическое поведение k на разных станциях привело и к отсутствию корреляции между $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ (рис. 3д, 3е, последний столбец К).

На рис. 4 приведены изменения k на станциях КЛ. Станции приведены в порядке убывания жесткости станции (возрастания широты). Видно, что корреляция $\Delta R_{\text{сгс}}$ с B_z растет с увеличением широты, а с B_y падает (рис. 4а). Антикореляция $\Delta R_{\text{сгс}}$ с B и E_y растет с увеличением широты (рис. 4б).

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже указывалось выше, во время бури 7–8.IX.2017 наибольшее понижение порогов наблюдается в максимуме бури на главной фазе ($Dst = -142$ нТл), и составляет 14% для $\Delta R_{\text{сгс}}$ (на

ст. Иркутск) и 35% для $\Delta R_{\text{эф}}$ (на ст. Кингстон). Широтная кривая $\Delta R_{\text{сгс}}$ (R_c) на всех фазах демонстрирует классическую форму с максимумом падения жесткости обрезания на среднеширотных (3–4 ГВ) станциях [1, 6]. Наибольшее падение наблюдательных жесткостей достигается при $R_c = 3.66$ ГВ. Широтные зависимости модельных $\Delta R_{\text{эф}}$ (R_c) не представляют характерной кривой с максимумом падения жесткостей на среднеширотных станциях. На главной и восстановительной фазах они возрастают с возрастанием R_c . Для жесткостей >3 –4 ГВ модельные кривые $\Delta R_{\text{эф}}$ на главной фазе находятся в хорошем согласии с наблюдательными кривыми $\Delta R_{\text{сгс}}$ (R_c), в то время как при малых жесткостях (высокие широты) кривые $\Delta R_{\text{эф}}$ и $\Delta R_{\text{сгс}}$ расходятся. В работе [8] при исследовании бури в ноябре 2003 г. отмечено, что для жесткостей $R_c < 6$ ГВ широтные зависимости, полученные с использованием модели $Ts01$, сильно отличаются от зависимостей, полученных с использованием данных нейтронных мониторов. Аналогично в работе [18] сравнивались жесткости обрезания, вычисленные траекторным методом при помощи различных магнитосферных моделей во время нескольких бурь с результатами наблюдений на нейтронных мониторах и космическом аппарате *CORONAS-F*. Авторы этой работы также утверждают, что для интенсивных бурь результаты для средних широт, полученные с использованием модели $Ts01$, могут значительно отличаться от наблюдений.

Расхождение модельных и наблюдательных значений в области малых жесткостей (высокие широты) может говорить о том, что модель $Ts01$ недостаточно хорошо описывает распределение магнитных полей в магнитосфере в области более высоких широт. Возможно, это связано с тем, что модель $Ts01$, которая использовалась при расчете $R_{\text{эф}}$, не в полной мере учитывает некоторые токовые системы, которые, как выяснилось в последнее время, могут иметь большое значение для раз-

вития сильных геомагнитных бурь. В частности, в работе [19] найдено, что для развития больших бурь существенное значение может иметь система токов DP , развивающихся в высокоширотных областях магнитосферы. Кроме того, модель $Ts01$ описывает возмущенное магнитное поле внутренней и околоземной магнитосферы в области $R \leq 15R_E$. Энергия, запасенная в хвосте магнитосферы, в том числе в более дальней ее части, инициирует и поддерживает некоторые важные магнитосферные процессы [20, 21]. В то время как модельные геомагнитные пороги $R_{эф}$ не учитывают влияние поля среднего и дальнего хвоста, регистрируемые на земле космические лучи, использованные для определения $\Delta R_{сгс}$, испытывают влияние поля всей магнитосферы.

Изменение геомагнитных порогов ΔR (как $\Delta R_{сгс}$, так и $\Delta R_{эф}$) на масштабе всей бури 7–8.IX.2017, а также на ее главной фазе наиболее сильно коррелирует с Dst -индексом, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в контроле вариаций жесткостей обрезания КЛ. Значительная чувствительность к Dst является самой стабильной чертой взаимодействия геомагнитных порогов с геомагнитосферой, которая отмечена ранее. В [22] найдено, что связь ΔR с геомагнитной активностью демонстрирует четкую закономерность — корреляция увеличивается с уменьшением Dst , т.е. с ростом интенсивности бури. При этом, сильная связь с Dst обычно поддерживается на всех фазах бури. Поэтому достаточно неожиданным является отсутствие связи $\Delta R_{сгс}$ с Dst на восстановительной фазе исследуемой бури. На этой фазе контроль $\Delta R_{сгс}$ геомагнитной активностью осуществляется через Kp индекс. Dst определяется по вариациям наземного магнитного поля на низкоширотных станциях (18° – 35°) и отражает эффект экваториального кольцевого тока. Кроме того, в Dst также вносят вклад частичный кольцевой ток [23], токи на магнитопаузе [24, 25] и поперечные токи хвоста [26–28]. Индекс Kp определяется по субавроральным станциям (44° – 62°). Во время сильного магнитного возмущения, когда авроральный овал смещается к югу, станции, входящие в сеть Kp , начинают фиксировать эффекты магнитосферных токов области высоких широт. Таким образом, можно предположить, что на восстановительной фазе бури 7–8.IX.2017 вариации жесткости обрезания $\Delta R_{сгс}$ регулировались не столько распадом кольцевого тока, сколько влиянием высокоширотных токовых систем. В вариациях $\Delta R_{эф}$ такого эффекта на восстановительной фазе не наблюдается, Dst значительно влияет на $\Delta R_{эф}$, а вклад Kp практически отсутствует. Эту разницу в

чувствительности $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ к индексам геомагнитной активности, по-видимому, опять надо отнести к недостаточной чувствительности модели $Ts01$ к процессам, происходящим в высоких широтах магнитосферы в случае рассматриваемой бури.

Рассмотрение зависимостей изменений порогов от исследуемых параметров на главной фазе бури, показывает, что модельные и наблюдательные геомагнитные пороги демонстрируют очень похожую картину. В вариации ΔR вносят вклад практически все параметры магнитосферы и солнечного ветра. При этом, корреляция между $\Delta R_{эф}$ и $\Delta R_{сгс}$ высокая ($k = 0.9 \pm 0.1$), как видно из последнего столбца рис. 3в, 3г. Наиболее заметная разница в рис 3в и 3г заключается в том, что в корреляции $\Delta R_{сгс}$ как с электромагнитными параметрами, так и с динамическими V и P просматривается заметная зависимость от широты станции наблюдения. В то же время, корреляция $\Delta R_{эф}$ с параметрами ММП, СВ и магнитосферы не показывают сколько-нибудь четкой картины зависимости от широты станции КЛ.

Отдельного рассмотрения требует восстановительная фаза бури, диаграммы которой (рис. 3д, 3е) резко отличаются от диаграмм, характеризующих ситуацию на масштабе всей бури и в главной фазе. Во-первых, коэффициенты корреляции на этом этапе сильно уменьшаются, особенно это заметно для $\Delta R_{сгс}$. Следует отметить, что для тех немногих бурь, для которых в литературе рассматривались зависимости ΔR от параметров магнитосферы и межпланетной среды, такого уменьшения k на восстановительной фазе не наблюдалось. Для бурь 20.XI.2003 [29], 7–8.XI.2004 [30] и 14.XII.2006 [31] k между ΔR и параметрами гелио- и магнитосферы на восстановительной фазе были либо одного порядка с соответствующими k на главной фазе, либо превышали их. Кроме того, из рис. 2д, 2е видно, что на восстановительной фазе коэффициенты корреляции $\Delta R_{сгс}$ и $\Delta R_{эф}$ со всеми исследуемыми параметрами для разных станций отличаются друг от друга хаотическим образом. Такая хаотизация отклика ΔR на параметры магнитосферы может быть связана с особенностями возмущенного периода в магнитосфере в начале сентября 2017 г. Как упоминалось во введении, в это время наблюдалась повышенная активность на Солнце, которая генерировала вспышки и CME . На пути к Земле CME взаимодействовали между собой, а также с другими межпланетными образованиями, поэтому в околоземном пространстве сформировалась сложная комплексная структура, содержащая ударные волны, 2 области сжатия (“sheaths”) перед межпланетными CME , два маг-

нитных облака, и два магнитных “поршня” с увеличенной геоэффективностью [32, 33]. Южная компонента B_z , ассоциированная со сложным комплексом областей сжатия и магнитного облака [17, 32], инициировала магнитную бурю с максимальным падением $Dst = -142$ нТл в 01.00 UT 8.IX.2017 (рис. 1). Восстановление магнитосферы после главной фазы бури было прервано через несколько часов приходом второй области сжатия и последовавшего за ней второго магнитного облака с полем южной направленности [17], которое генерировало повторное падение Dst индекса до -123 нТл. Такая нестандартная восстановительная фаза бури, когда наблюдались противоположные тенденции – восстановление магнитосферы от предыдущего возмущения, конкурировавшее с развитием нового возмущения – могло обусловить низкие значения k между ΔR и параметрами ММП, СВ и магнитосферы, а также хаотическое нерегулярное поведение k на разных станциях наблюдения. Меняющиеся условия в токовых системах могут вызывать частичный кольцевой ток с сильной анизотропией, а представленные данные по $\Delta R_{\text{сгс}}$ изотропны, поэтому рассчитанные $\Delta R_{\text{сгс}}$ могут не соответствовать реальности и, следовательно, плохо коррелировать с Dst .

ВЫВОДЫ

Мы рассчитали геомагнитные пороги R во время возмущенной магнитосферы 7–8.IX.2017 двумя методами. Далее мы рассчитали корреляции ΔR с параметрами межпланетной среды и магнитосферы во время эволюции бури – в ее начальной, главной и восстановительной фазах и рассмотрели широтные особенности полученных корреляций. Мы получили следующие результаты:

1. Во время бури 7–8.IX.2017 наибольшее понижение порогов наблюдается в максимуме бури ($Dst = -142$ нТл), достигая значений $\Delta R_{\text{сгс}} = -0.52$ ГВ (Иркутск) и $\Delta R_{\text{эф}} = -0.66$ ГВ (Кингстон).

2. Во время всех фаз бури наблюдательная широтная кривая $\Delta R_{\text{сгс}}(R_c)$ принимает классическую форму с максимумом падения жесткости обрезания на среднеширотных станциях ($R_c = 3.66$ ГВ). Широтное распределение модельных $\Delta R_{\text{эф}}$ существенно отличается от распределения наблюдательных $\Delta R_{\text{сгс}}$, для средних и высоких широт ($R_c \leq 3.66$ ГВ, $\varphi \geq 53^\circ$ N и $\varphi \geq 40^\circ$ S).

3. Наши результаты свидетельствуют о том, что во время бури 7–8.IX.2017 модель магнитосферы Ts01 недостаточно хорошо отражала простран-

ственную конфигурацию возмущенной магнитосферы в области высоких широт.

4. Изменение как наблюдательных, так и модельных геомагнитных порогов на масштабе всей бури 7–8.IX.2017 наиболее сильно коррелирует с Dst -индексом, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в контроле вариаций жесткостей обрезания КЛ. Также виден значительная зависимость $\Delta R_{\text{сгс}}$ и $\Delta R_{\text{эф}}$ от параметров солнечного ветра V и несколько меньшая от магнитных параметров. $\Delta R_{\text{эф}}$ контролируется парой B и B_z , а $\Delta R_{\text{сгс}}$ – B и B_y .

5. Чувствительность ΔR к динамическим и магнитным параметрам межпланетной среды различна на разных фазах бури и отличается от чувствительности, посчитанной на масштабе всей бури.

6. Для $\Delta R_{\text{сгс}}$ корреляция с магнитными параметрами в главной фазе демонстрирует тенденцию изменяться в зависимости от станции наблюдения регулярным образом. Для $\Delta R_{\text{эф}}$ такой тенденции не наблюдается. На восстановительной фазе наблюдается хаотическое нерегулярное поведение k в зависимости от станции наблюдения, вызванное особенностями бури и связанными с ними анизотропиями.

Взаимосвязь вариаций геомагнитных порогов КЛ с параметрами геомагнитной активности и магнитосферы различна на разных фазах бури, поскольку она обусловлена динамикой глобальных магнитосферных токовых систем, которые в процессе эволюции магнитного возмущения развиваются и затухают различным образом в разные периоды времени. Особенности взаимодействия солнечного ветра и магнитосферы в процессе эволюции бури определяют специфический отклик геомагнитных порогов КЛ на параметры гелиосферы и магнитосферы на разных фазах бури. В частности, особенности корреляции порогов с параметрами гелио- и магнитосферы на восстановительной фазе бури 7–8.IX.2017 диктовались особенностями этой бури, которые были обусловлены сложной структурой в околоземном пространстве, содержащей ударные волны, области сжатия, магнитные облака, и магнитные “поршни”.

Расчеты по методу СГС получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ангара” (<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>) и научной установки “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей” <https://ckp-rf.ru/usu/433536/>.

Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dorman L.I.* Elementary particle and cosmic ray physics. Elsevier. New York. 1963. 456 p.
2. *Kress B.T., Hudson M.K., Selesnick R.S. et al.* Modeling geomagnetic cutoffs for space weather applications // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. № 7. P. 5694–5702. <https://doi.org/10.1002/2014JA020899>
3. *Буров В.А., Мелешков Ю.С., Очелков Ю.П.* Методика оперативной оценки уровня радиационной опасности, обусловленной возмущениями космической погоды, при авиаперевозках // *Гелиогеофизические исслед.* 2005. Вып. 7. С. 1–41.
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. S01001. <https://doi.org/10.1029/2003SW000056>
5. *Mask E.* Starship: Earth to Earth in less than 60 minutes. // 68th International Astronautic Congress. Adelaide, Australia. 25–29 Sep. 2017.
6. *Flueckiger E.O., Shea M.A., Smart D.F.* On the latitude dependence of cosmic ray cutoff rigidity variations during the initial phase of a geomagnetic storm // *Proc. 20th Int. Conf. Cosmic Rays.* August 1987. Moscow. USSR. 1987. V. 4. P. 2016–2020.
7. *Antonova O.F., Baisultanova L.M., Belov A.V. et al.* The longitude and latitude dependences of the geomagnetic cutoff rigidity variations during strong magnetic storms // *Proc. 21st Int. Cosmic Ray Conf.* January 1990. Adelaide, Australia. V. 7. P. 10–13.
8. *Belov A., Baisultanova L., Eroshenko E. et al.* Magnetospheric effects in cosmic rays during the unique magnetic storm on November 2003 // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. A09S20. <https://doi.org/10.1029/2005JA011067>
9. *Данилова О.А., Демина И.А., Птицына Н.Г. и др.* Картирование жесткости обрезания космических лучей во время главной фазы магнитной бури 20 ноября 2003 г. // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2019. Т. 59. № 2. 3. С. 160–167. <https://doi.org/10.1134/S0016794019020056>
10. *Яновский Б.М.* Земной магнетизм. (4-ое издание). Изд. Ленинградского Университета, Ленинград. 1978. 592 стр.
11. *Shea M.A., Smart D.F., McCracken K.G.* A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field // *J. Geophys. Res.* 1965. V. 70. P. 4117–4130.
12. *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // *J. Geophys. Res.* 2002a. 107. A8. <https://doi.org/10.1029/2001JA000219>
13. *Tsyganenko N.A.* A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 2. Parametrization and fitting to observation // *J. Geophys. Res.* 2002b. 107. A8. <https://doi.org/10.1029/2001JA000220>
14. *Dvornikov V.M., Kravtsova M.V., Sdobnov V.E.* Diagnostics of the electromagnetic characteristics of the interplanetary medium based on cosmic ray effects // *Geomagn. Aeron. (Engl. Transl.).* 2013. V. 53, iss. 4. P. 430–440.
15. *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *JGR.* 2005. V. 110. A02104. <https://doi.org/10.1029/2004JA010649>
16. *Chertok I.M., Belov A.V., Abunin A.A.* Solar Eruptions, Forbush Decreases and Geomagnetic Disturbances from Outstanding Active Region 12673 // *Space Weather.* 2018. V. 16. P. 1549–1568. <https://doi.org/10.1029/2018SW001899>
17. *Hajra R., Tsurutani B.T., Lakhina G.S.* The Complex Space Weather Events of 2017 September // *ApJ.* 2020. V. 899. № 1. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aba2c5>
18. *Kudela K., Bucik R.* Low Energy Cosmic Rays and the Disturbed Magnetosphere // *Proc. 2nd Int. Symp. SEE-2005.* Nor-Amberd, Armenia. 2005. P. 57–62. <https://arxiv.org/pdf/1303.4052.pdf>
19. *Левитин А.Е., Дремухина Л.А., Громова Л.И. и др.* Генерация магнитного возмущения в период исторической магнитной бури в сентябре 1859 г. // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2014. Т. 54. № 3. с. 324–332. <https://doi.org/10.7868/S0016794014030110>
20. *Ganushkina N.Y., Liemohn M.W., Dubyagin S.* Current systems in the Earth's magnetosphere // *Reviews of Geophysics.* 2018. V. 56. P. 309–332. <https://doi.org/10.1002/2017RG000590>
21. *Borovsky J.E., Thomsen M.F., Elphic R.C. et al.* The transport of plasma sheet material from the distant tail to geosynchronous orbit // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. A9. P. 20297–20331.
22. *Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. и др.* Влияние параметров солнечного ветра и геомагнитной активности на вариации жесткости обрезания космических лучей во время сильных магнитных бурь // *Геомагнетизм и аэронавигация.* 2019. Т. 59. № 5. С. 569–577. <https://doi.org/10.1134/S0016793219050098>
23. *Liemohn M.W., Kozyra J.U., Thomsen M.F. et al.* Dominant role of the asymmetric ring current in producing stormtime *Dst* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. A6. P. 10.883–10.904. <https://doi.org/10.1029/2000JA000326>
24. *Burton R.K., McPherron R.L., Russell C.T.* An empirical relationship between interplanetary conditions and *Dst* // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. Is. 31. P. 4204–4214. <https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204>
25. *Siscoe G.L., McPherron R.L., Jordanova V.K.* Diminished contribution of ram pressure to *Dst* during magnetic storms // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110 P. A12227. <https://doi.org/10.1029/2005JA011120>
26. *Dubyagin S., Ganushkina N., Kubyschkina M. et al.* Contribution from different current systems to SYM and ASY midlatitude indices // *J. Geophys. Res.* 2014. V. 119. P. 7243–7263. <https://doi.org/10.1002/2014JA020122>

27. *Ohtani S., Nose M., Rostoker G. et al.* Storm-substorm relationship: Contribution of the tail current to *Dst* // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. A10. P. 21199–21209. <https://doi.org/10.1029/2000JA000400>
28. *Turner N.E., Baker D.N., Pulkkinen T.I. et al.* Evaluation of the tail current contribution to *Dst* // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № A3. P. 5431–5439. <https://doi.org/10.1029/1999JA000248>
29. *Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. и др.* Динамика жесткости обрезания космических лучей и параметров магнитосферы во время различных фаз бури 20 ноября 2003 г. // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2021. Т. 61. № 2. С. 160–171. <https://doi.org/10.31857/S0016794021010120>
30. *Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И.* Корреляция жесткости обрезания космических лучей с параметрами гелиосферы и геомагнитной активности на разных фазах магнитной бури в ноябре 2004 г. // *Геомагнетизм и Аэрономия*. 2020. Т. 60. № 3. С. 281–292. <https://doi.org/10.31857/S0016794020020145>
31. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.N. et al.* PAMELA's measurements of geomagnetic cutoff variations during the 14 December 2006 storm // *Space weather*. 2016. V. 14. № 3. <https://doi.org/10.1002/2016SW001364>
32. *Shen C., Xu M., Wang Y. et al.* Why the Shock-ICME Complex Structure Is Important: Learning from the Early 2017 September CMEs // *The Astrophysical Journal*. 2018. V. 861. № 1. pp. 861–960. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac204>
33. *Scolini C., Chane E., Temmer M. et al.* CME-CME Interactions as Sources of CME Geoeffectiveness: The Formation of the Complex Ejecta and Intense Geomagnetic Storm in 2017 Early September // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 2020. V. 247(1). <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab6216>

УДК 520.244.272.5

СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ НА РАТАН-600

© 2023 г. В. М. Богод¹ *, М. К. Лебедев¹, Н. Е. Овчинникова¹, А. М. Рипак¹, А. А. Стороженко¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН (Санкт-Петербургский филиал),
Санкт-Петербург, Россия

*vbog_spb@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2022 г.

После доработки 30.07.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

Современные исследования радиоизлучения Солнца осложняются непрерывным усилением мощности и многочастотностью внешних помех, которые часто полностью перекрывают важные диапазоны частот. Многие актуальные задачи в солнечной радиоастрономии нуждаются в больших эффективных площадях радиотелескопов, высоких разрешениях по частоте и по времени, точных пространственных измерениях и большом динамическом диапазоне. Становится актуальной смена концепции приемной регистрирующей аппаратуры. В работе рассматриваются актуальные задачи физики солнечной короны в сочетании с оптимальными методами наблюдений на крупных инструментах. Рассмотрены особенности и трудности сочетания высоких параметров: динамического, пространственного, временного, частотного разрешений. Предложенные решения наблюдательно-го комплекса нового поколения реализуют возможности интеллектуального выбора условий регистрации в многооктавном режиме с многоканальностью более 8000 каналов/ГГц с временным разрешением до 8 мс/спектр. Становится доступным мультиобъектный режим наблюдений от мощных вспыхивающих объектов до слабых структур различной природы. Высокоскоростная обработка данных позволяет реализовать on-line режим устранения помех, который основан на быстром статистическом анализе спектра с выделением негауссовых (помеховых) структур. Предложены методы скоростного анализа данных большого объема (метод главных компонент) и их представления для пользователя. Приведены примеры работы комплекса в диапазоне 1–3 ГГц. Рассматриваются перспективы нового подхода для мультиобъектных радиоастрономических наблюдений при реализации режима слежения на РАТАН-600: от рекомбинационных линий до широкодиапазонных спектров, от слабоконтрастных флуктуаций до быстрых изменений во вспышках и др.

DOI: 10.31857/S0023420623010016, EDN: FHGJCF

ВВЕДЕНИЕ

Многолетний опыт спектральных исследований радиоизлучения Солнца на РАТАН-600 указывает на важные проблемы, возникающие при изучении сложных по структуре активных областей (АО) на Солнце. Здесь проявляется действие различных механизмов, таких как: тепловое излучение от окружающих пятна флоккул, волокон, трехмерной структуры петель; циклотронное излучение над пятнами; гиротронное излучение между пятнами; возбуждаемое высокоэнергичными электронами плазменное излучение во всплесках; и др. В предвспышечном и вспышечном состояниях, АО непрерывно сотрясается под воздействием различных квазипериодических колебаний.

Нестационарные процессы в короне представляют собой ключевой элемент геоэффективной солнечной активности. Проблема нагрева нестационарной короны Солнца и звезд остается од-

ной из главных нерешенных проблем современной плазменной астрофизики. Принято считать, что нагрев осуществляется маломощными энерговыделениями, связанными или с микро- и нановспышками, или диссипацией магнитогидродинамических волн, или же их комбинацией.

РАДИОТЕЛЕСКОП РАТАН-600 ДЛЯ ЗАДАЧ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

РАТАН-600 сегодня является рефлекторным радиотелескопом с умеренным пространственным разрешением, его основные преимущества состоят в большой мгновенной эффективной поверхности, широкой рабочей полосе частот (от 700 МГц до 40 ГГц), высокой точности поляризационных измерений и регулярности наблюдений [1]. Большая мгновенная принимающая поверхность радиотелескопа РАТАН-600 в сочетании с многооктавным диапазоном частот и высоким быстродействием позволяет наблюдать

нестационарные процессы в широком интервале интенсивностей от микро- и нановспышек до мощных вспышек. Среди основных направлений по тематике солнечной короны преобладают задачи широкодиапазонной радиоспектроскопии: процессы магнитного пересоединения в арочных структурах [2, 3, 4]; процессы, связанные с зарождением активности и магнитной природой генерации на ее ранней стадии [5]; механизмы, отвечающие за возникновение и существование долгоживущих нетепловых структур [6]; тонкие спектральные структуры в солнечной короне, связанные с квазипериодическими пульсациями, (струями и surges) [7], природой шумовых бурь и квазилинейчатым излучением [8–11].

Сегодня на инструменте ведутся работы по реализации режима слежения и частых азимутальных наблюдений в интервале ± 2 часа от местного полудня. Улучшение этих параметров достигается созданием приемной аппаратуры с панорамным перекрытием рабочей полосы частот с высоким быстродействием и широким динамическим диапазоном. Это делает возможным реализацию современных методов устранения промышленных помех и открывает новые возможности для тонких спектральных исследований излучения короны Солнца.

Одной из принципиальных трудностей для всех радиоастрономических инструментов является сложность изучения механизмов излучения слабых корональных структур на фоне высокой яркости (свыше 10^6 К), которая резко повышает уровень шумов принимающей аппаратуры, и делает невозможным регистрацию маломощных объектов. Наличие панорамного анализа данных с высоким относительным частотным разрешением 10^{-5} и большой динамический диапазон нового приемного комплекса РАТАН-600 предоставляет возможность проводить диагностику плазмы по данным радиоспектроскопии, проверять модельные оценки по магнитному пересоединению, связанные с определением доли энергии, выделяемой пересоединением, идущей на прямой нагрев плазмы, макроскопические течения (например, струи) и нетепловые частицы, и др.

МНОГООКТАВНАЯ СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЯ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Анализ современной радиоприемной аппаратуры для исследования структуры радиоизлучения солнечной короны [1] показывает, что специфика аппаратуры разделилась на три направления:

1) радиотелескопы-рефлекторы, которые обладают сплошной поверхностью, широкой многократной полосой приема и, как следствие, высокой

чувствительностью по яркостной температуре. Сегодня крупные рефлекторные инструменты практически не используются в регулярных наблюдениях Солнца. Исключением является радиотелескоп РАТАН-600, на котором регулярные многоволновые наблюдения Солнца проводятся с 1975 г.

2) радиотелескопы-интерферометры, которые обладают высоким двумерным пространственным разрешением и возможностью длительно сопровождать Солнце.

3) множество одиночных зеркал с пространственным разрешением, превышающим размер диска Солнца, которые предназначены для измерения общего потока излучения на различных отдельных частотах с целью мониторинга активности Солнца.

Природа радиоизлучения является довольно сложной для адекватного ее изучения средствами солнечной радиоастрономии, несмотря на высокую чувствительность радиоволн к проявлению тонкой структуры радиоизлучения короны. Это происходит из-за высокой яркостной температуры короны (свыше 10^6 К), необходимости большого динамического диапазона, подробного спектрального и поляризационного анализа.

В дополнении к этому, необходимо развивать следующие параметры, важные для эффективности крупного рефлекторного инструмента:

- многопрограммность;
- мультиобъектность;
- широкодиапазонность и предельное спектральное разрешение;
- высокое временное разрешение;
- адекватное устранение промышленных помех.

Активное использование диапазона 1–3 ГГц для мобильной связи, бытовой техники и авиационных целей практически закрыло радиоастрономические наблюдения на этих частотах. Для решения поставленных выше вопросов предложена и начата реализация новой концепции приемной техники [12, 13], которая основана на высокоскоростном считывании данных на АЦП до 6 ГГц без использования переноса радиосигнала в область низких частот (рис. 1).

АНАЛОГОВАЯ ЧАСТЬ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Сигнал принимается рупорным коническим облучателем с биортогональной круговой поляризацией АС6.201.02 диапазона 1–3 ГГц производства АО “Скард-Электроникс” (г. Курск). Входные малошумящие усилители (МШУ) реализованы на микросхемах и обеспечивают шумо-

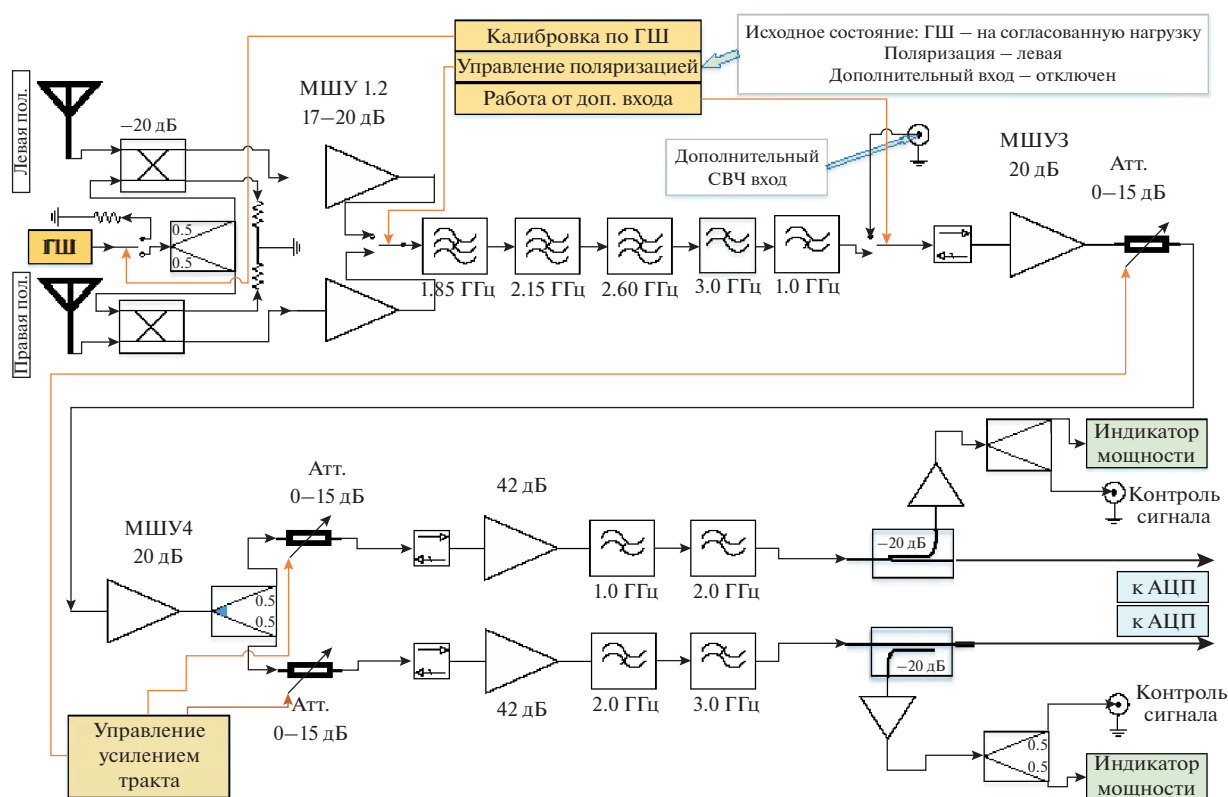


Рис. 1. Схема аналоговой части спектрального комплекса.

вую температуру усилителя в диапазоне 40–70 К. Выходы этих усилителей соединены со входами переключателя, обеспечивающего поочередное подключение сигнала с левой и правой поляризациями к измерительному тракту радиометра.

Блок фильтров, следующий за переключателем, состоит из ФНЧ с частотой среза 3 ГГц и ФВЧ с частотой среза 1 ГГц и режекторных фильтров с центральными частотами 1.85, 2.15, 2.63 ГГц и полосами подавления по уровню –30 дБ шириной от 120 до 150 МГц. Последние предназначены для подавления сигналов передатчиков мобильной связи, чтобы исключить перегрузку усилительного тракта радиометра. Регулировка усиления радиометра осуществляется аттенуаторами ослаблением до 31.5 дБ каждый с цифровым управлением и шагом перестройки 0.5 дБ. Усилители производства ОАО “Микран” повышают уровень радиоастрономического сигнала примерно до –10 дБм, что соответствует режиму работы входных усилителей АЦП без перегрузки при пиковых значениях сигнала.

На выходе после набора усиления сигнал делится на два канала, формирующих две зоны Найквиста в диапазонах 1–2 и 2–3 ГГц. Усилители производства ОАО “Микран” повышают уровень радиоастрономического сигнала примерно

до –10 дБм, что соответствует режиму работы входных усилителей АЦП без перегрузки при пиковых значениях сигнала. Для контроля уровня сигнала и индикации выходной мощности в каналах предусмотрены ответвители, а вспомогательные усилители компенсируют коэффициент ответвления, составляющий примерно –20 дБ от основного канала.

Для контроля калибровки радиометра предусмотрен внутренний генератор шума на основе лавинно-пролетного диода с впрыскиванием во входной тракт радиометра сигнала с шумовой температурой порядка 100–200 К (в зависимости от частоты). Спектральная характеристика калибровочного сигнала табулирована.

ЦИФРОВАЯ ЧАСТЬ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО СПЕКТРАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

В основе схемы приемного комплекса работает принцип радиометра полной мощности, который в отличие от [14] основан на высокоскоростном цифровом считывании без использования квадратичного детектирования. Применен высокоскоростной 10-разрядный АЦП ev10aq190, который тактируется стабилизированным кварцевым генератором с низким джиттером, работаю-

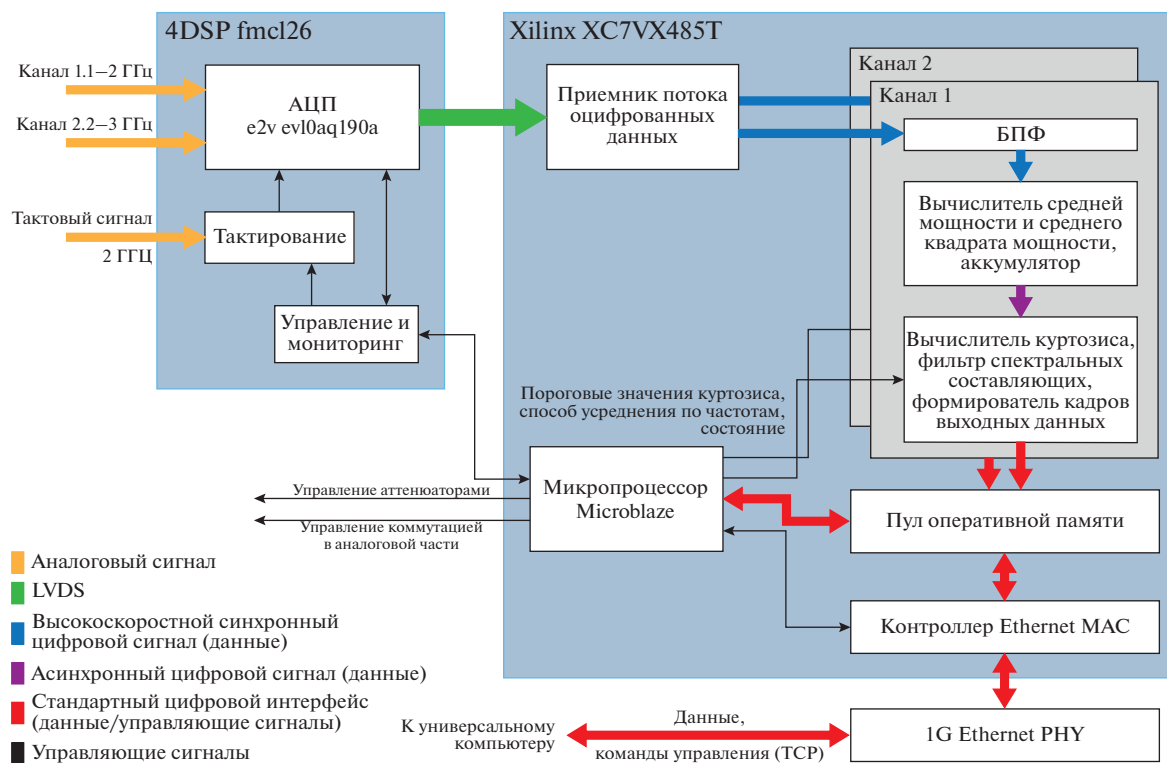


Рис. 2. Схема цифровой части спектрального комплекса.

щим на частоте 2 ГГц, что обеспечивает частоту дискретизации 2 Гвыб/с (рис. 2).

Спектрометр работает в режиме неполной выборки, используя 2-ю и 3-ю зоны Найквиста для диапазонов 1.0–2.0 и 2.0–3.0 ГГц соответственно. Выход АЦП демультимплексирован на два канала. Вся последующая обработка сигналов реализована на оценочной плате Xilinx VC707, несущей ПЛИС Virtex XC7VX485T. Блок-схема основного конвейера обработки показана на рис. 2. Аппаратное обеспечение ПЛИС выполняет массивную параллельную обработку, чтобы удовлетворить требования к пропускной способности. Преобразование Фурье длиной 16384 точек выполняется параллельно на 8 стандартных ядрах Xilinx XFFT по 2048 точек каждое, затем результаты сдвигаются по фазе, и заключительный этап преобразования выполняется на специально разработанном 8-точечном 8-канальном ядре БПФ. Следующий блок в конвейере накапливает значения мощности и квадрата мощности в частотных каналах, усредняя их по каждому 1024 спектрам мощности, и дополняет их оценочными значениями спектрального куртозиса (см. ниже). Чтобы уменьшить объем данных, формирователь выходного потока может усреднять значения мощности по 2, 4, 8, 16, 32, 64 или 128 частотным каналам, предоставляя информацию.

Достигнутые параметры спектрального комплекса:

- частотное разрешение: 122 кГц (10^{-5});
- число частотных каналов 8192/ГГц;
- временное разрешение: 8 мс/спектр;
- температура входных шумов аппаратуры: менее 100 К (на стенде);
- температура калибровочных шумов: 20 К;
- неравномерность частотной характеристики по диапазону: 3 дБ;
- динамический диапазон (с учетом автоматики): 90 дБ;
- коэффициент усреднения: по частоте 10^4 – 10^5 , по времени 10^4 ;
- полное усреднение: 10^9 .

Оценки указывают на высокую чувствительность в диапазоне 1–3 ГГц к наблюдениям источников на диске Солнца. Например, при полосе 10 МГц и постоянной времени 1 с на диске Солнца с антенной температурой в $6 \cdot 10^3$ К и площади антенны 10^3 м² чувствительность к регистрации слабых сигналов будет около 10^{-4} s.f.u. На практике регистрация слабых структур является труднодоступной из-за помех или наличия ярких объектов, на фоне которых они неразличимы. Однако хорошее заполнение спектра и обработка при по-

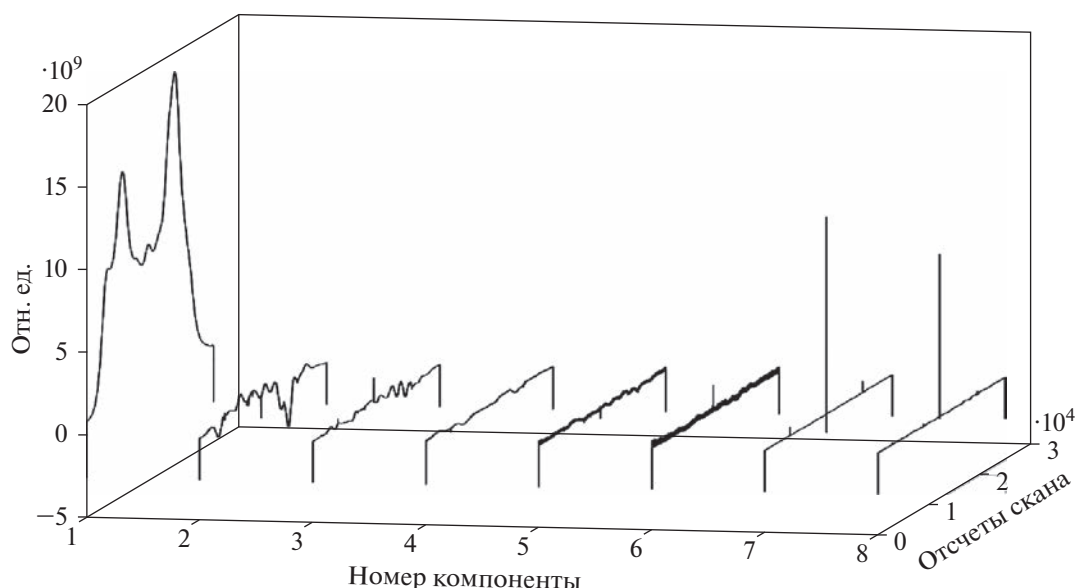


Рис. 3. Разложение одномерного скана диска Солнца по нескольким главным компонентам. Ось X – отсчеты скана, ось Y – номера компонент, ось Z – относительные амплитуды в безразмерных единицах.

мощи метода главных компонент позволяют анализировать свойства микро- и нановсплесков.

При использовании усреднения по частоте до 10^9 Гц и по времени до 10^2 с чувствительность по антенной температуре достигает 10^{-3} К или 10^{-3} Ян. Таким образом, эти параметры позволяют вести мультиобъектные наблюдения на РАТАН-600.

ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Применение методов, основанных на анализе статистических характеристик спектров принимаемых случайных сигналов, в которых присутствуют радиопомехи, базируется на предположении о том, что полезный исследуемый сигнал природного происхождения имеет гауссову статистику. Помеха искусственного происхождения имеет негауссову природу и вносит искажение в статистические характеристики сигнала. Исследуется функция вероятности распределения спектральной плотности мощности выходного сигнала радиотелескопа. Шумы системы и исследуемого источника имеют гауссово распределение с нулевым средним изменению статистики выходного сигнала радиотелескопа. Распределение мгновенного спектра мощности станет нецентральным (несимметричным).

Результаты усреднения мощностных спектров за некоторый промежуток времени позволяют выявить характеристики функций распределения, по которым можно судить о наличии или отсутствии радиопомехи на конкретной частоте анализа и

корректировать в спектральной области результаты измерения для исключения влияния помехи. Общая архитектура цифрового спектрометра, использующего средство оценки спектрального эксцесса куртозиса (СК) как 4-й нормированный центральный момент распределения случайной величины. Для его вычисления применяется быстродействие работы АЦП и сигнального процессора.

Спектрометр выполняет цифровое преобразование Фурье для входящих кадров данных, каждый из которых имеет длину N отсчетов. Затем по полученным M спектрам мощности в каждом спектральном канале k вычисляется оценка величины спектрального куртозиса:

$$V_k^2 = \frac{\sigma_k^2}{\mu_k^2},$$

где $\mu_k = \langle \hat{P}_k \rangle$ и $\sigma_k^2 = \langle \hat{P}_k^2 \rangle - \langle \hat{P}_k \rangle^2$ – оценки для среднего значения и дисперсии мощности в k -м спектральном канале. Для гауссова процесса $V_k^2 = 1$. Оценки μ_k и σ_k^2 вычисляются в эксперименте по результатам конечного количества измерений.

Усреднение ведется по M реализациям-выборкам длиной N . Для вычисления средних значений по M реализациям используются обозначения:

$$S_1 = \sum_{i=1}^M \hat{P}_{ki}; \quad S_2 = \sum_{i=1}^M \hat{P}_{ki}^2.$$

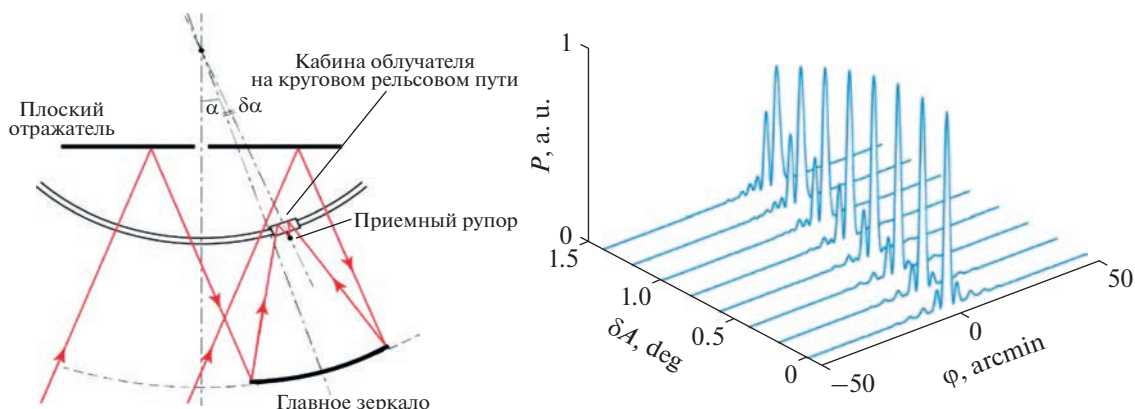


Рис. 4. Режим сопровождения на РАТАН-600. Слева: схема движения приемной кабины по дуговым рельсам в азимутальной системе главного зеркала и Плоского отражателя; справа: диаграммы системы Юг + Плоский при различных значениях выноса зеркала приемной кабины из фокуса.

Тогда оценки среднего значения и дисперсии приобретают следующий вид:

$$\mu_k = \frac{1}{M} S_1; \quad \sigma_k^2 = \frac{MS_2 - S_1^2}{M(M-1)},$$

а оценка для спектрального куртозиса [15] —

$$V_k^2 = \frac{M}{M-1} \left(M \frac{S_2}{S_1^2} - 1 \right).$$

Метод спектрального куртозиса успешно опробован на Owens Valley Solar Array при работе с тремя параболами диаметром 1.8 м и на Korean Solar Radio Burst Locator (KSRBL), для которого авторы в Center for Astronomical Signal Processing and Electronics Research (CASPER) создали измерительный цифровой комплекс с программным обеспечением [16].

МЕТОД ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Метод главных компонент [17], впервые предложенный еще К. Пирсоном в 1901 г., или разложение по эмпирическим ортогональным функциям, применяется к данным, записанным в виде матрицы. При анализе главных компонент выбирается направление максимального изменения данных, называемой первой главной компонентой. После исключения первой главной компоненты определяется следующее направление, максимизирующее остаточную вариацию (*ортогональный* разброс данных вокруг первой прямой), и т.д. Таким образом, факторы последовательно выделяются один за другим. Так как каждый последующий фактор определяется так, чтобы максимизировать изменчивость, оставшуюся от предыдущих, то факторы оказываются независимыми друг от друга, другими словами, некоррелированными или ортогональными. При

помощи такого ортогонального базиса можно описать основные параметры, определяющие исходный массив данных. Так как моды отсортированы по их вкладу в общую энергию, крупномасштабные структуры представляются небольшим количеством первых главных компонент.

В применении к данным солнечного радиоизлучения таким образом выявляется медленно меняющаяся составляющая, а также помеховые и шумовые составляющие, позволяя мгновенно выделить быстрые процессы в ограниченном спектральном диапазоне в отдельных активных областях Солнца.

РЕЖИМ СЛЕЖЕНИЯ

Режим слежения является перспективным для радиотелескопа РАТАН-600, поскольку он позволяет проводить исследования динамики излучения радиоисточников (вспышки на Солнце и звездах, блазары и др.). С другой стороны, можно значительно увеличивать чувствительность наблюдений, применяя временное накопление сигнала. Возможен также ряд смешанных режимов. Режим слежения реализуется на Южном секторе с Перископом и схематически представлен на рис. 4 [18].

Для реализации процесса слежения создана система АСУ облучателя, которая должна решать следующие задачи [19]:

- контроль параметров антенной системы — скорость облучателя, положение облучателя, скорость каретки, положение каретки, уклон облучателя от горизонтали по двум угловым координатам γ и β ;

- поддержка реализации следующих вариантов наблюдений — слежение облучателем со сканированием кареткой области наблюдения, слежение со скольжением каретки, слежение за заданной координатой.

ВЫВОДЫ

Для наблюдений Солнца на радиотелескопе РАТАН-600 создан мультиобъектный спектрометр нового типа со следующими возможностями:

1) Достигнутое максимальное спектральное разрешение составляет 122 кГц в полосах частот 1.0–2.0 и 2.0–3.0 ГГц.

2) Выходной спектр в полосе 1 ГГц может иметь от 64 до 8192 частотных каналов, в зависимости от требований наблюдателя, с выходной скоростью 120 спектров/с.

3) Реализована возможность удаления радиопомех с использованием статистического алгоритма, основанного на оценке спектрального эксцесса (куртозиса).

4) Реализована высокоскоростная обработка данных с выделением тонкой структуры сигнала и помех методом главных компонент.

5) Показано, что метод главных компонент открывает новый параметр анализа солнечных структур на глубину спектральной изменчивости.

Результаты работы указывают, что на РАТАН-600 могут быть доступны наблюдения различных объектов в предельных режимах, как по частотному перекрытию, так и по частотному разрешению при максимальной чувствительности и высоком временном разрешении. Данная концепция может быть использована при создании приемных устройств для задач исследования несолнечных объектов.

Применение новой аппаратуры и высокоскоростной регистрации открывает исследования динамических характеристик в ряде задач, таких как:

– глубокая диагностика предвспышечного состояния солнечной плазмы и вспышечного процесса.

– процессы удержания горячей плазмы в магнитных ловушках.

– измерения критических градиентов магнитного поля по спектрально-поляризационным наблюдениям источников над нейтральной линией.

– создание адекватной модели пятна на основе механизмов формирования спектров излучения в широком диапазоне высот.

Часть наблюдательных данных получена на уникальной научной установке радиотелескоп РАТАН-600 САО РАН; работа по обработке наблюдательных данных выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-250 (13.МНПМУ.21.0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Khaikin V.B., Storozhenko A.A., Bogod V.M. Radioheliographs and Radio Reflectors in Solar Plasma Studies //

Astrophysical Bulletin. 2019. V. 74. P. 221–233. <https://doi.org/10.1134/S1990341319020111>

2. Bogod V.M. Prospects for Ground-Based Solar Radio Astronomy in Russia // Proceedings of All-Russian Conference “Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century”. Nizhny Arkhyz. 2020. P. 399–404. https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_399
3. Bogod V.M., Yasnov L.V. Determination of the Structure of the Coronal Magnetic Field Using Microwave Polarization Measurements // Solar Physics. 2016. V. 291. P. 3317–3328. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0936-8>
4. Bogod V.M., Kaltman T.I. The magnetosphere of solar active region by radio observations in a wide wavelength range // Astronomical & Astrophysical Transactions. 2019. V. 31. № 3. <https://doi.org/10.31361/eaas.2018-2.008>
5. Bastian T., Gary D.E., Fleishman G.D. et al. Measuring Coronal Magnetic Fields with the Jansky Very Large Array and RATAN Telescopes // American Geophysical Union, Fall Meeting 2019. Abstract #SH41B-05.
6. Yasnov L.V., Bogod V.M., Gofman A.A. Spectrum and physical conditions in microflare generation regions at decimeter-wave frequencies // Astrophysical Bulletin. 2017. V. 72. № 1. P. 58–66. <https://doi.org/10.1134/S1990341317030075>
7. Nakariakov V.M., Anfinogentov S., Storozhenko A.A. et al. Quasi-periodic Pulsations in a Solar Microflare // The Astrophysical Journal. 2018. V. 859. № 2. P. 154. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabfb9>
8. Karlický M., Rybák J., Monstein C. Fourier Power Spectra of Solar Noise Storms // Solar Physics. 2018. V. 293. № 10. P. 143. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1367-5>
9. Дравских А.Ф., Дравских Ю.А. О возможности наблюдений линий водорода // Астрономический журнал. 2021. Т. 98. № 8. С. 694–704. <https://doi.org/10.31857/S0004629921080041>
10. Khersonskii V.K., Varshalovich D.A. The possibility of observing recombination lines in solar radiation // Астрономический журнал. 1980. Вып. 57. С. 621–623.
11. Dravskikh A.F., Peterova N.G., Topchilo N.A. Profile of the 9.85-GHz Neutral Hydrogen Line // Astronomy Reports. 2019. V. 68. № 3. P. 229–237. <https://doi.org/10.1134/S1063772919030028>
12. Bogod V.M., Lebedev M.K., Ovchinnikova H.E. и др. Спектрорадиометрия солнечной короны на крупных инструментах // Сб. докладов Всероссийской конференции “Физика солнечной плазмы”. ИКИ 7–11 февраля 2022.
13. Lebedev M.K., Ripak A.M., Bogod V.M. High-Speed Spectroradiometry using a Statistical Method of RFI Suppression for Radio Observations with RATAN-600 // Proceedings of the All-Russian Conference “Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century”, Nizhny Arkhyz, Russia, September 21–25, 2020. P. 413. https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_399
14. Tsybulev P.G. New-generation data acquisition and control system for continuum radio-astronomic obser-

- vations with RATAN-600 radio telescope: Development, observations, and measurements // *Astrophysical Bulletin*. 2011. V. 66. Iss. 1. pp. 109–122. <https://doi.org/10.1134/S199034131101010X>
15. *Nita G.M.* Spectral kurtosis statistics of transient signals // *MNRAS*. 2016. V. 458. P. 2530–2540. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw550>
 16. *Yujang Dou, Gary D.E, Zhiwei Liu et al.* The Korean Solar Radio Burst Locator (KSRBL) // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. 2009. V. 121. № 879. P. 512–526. <https://doi.org/10.1086/599624>
 17. *Bro R., Smilde A.K.* Principal component analysis // *Analytical Methods*. 2014. V. 6. P. 2812–2831. <https://doi.org/10.1039/c3ay41907j>
 18. *Storozhenko A., Lebedev M., Ovchinnikova N. et al.* Tracking mode in the southern sector with the periscope of the RATAN-600 radio telescope // *Proceedings of all-Russian conference, September 21–25, 2020 Nizhny Arkhyz, 2020 at Special Astrophysical Observatory of RAS*. https://doi.org/10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_407
 19. *Стороженко А.А., Богод В.М., Лебедев М.К. и др.* Система автоматического управления приемным зеркалом РАТАН-600 для режима слежения // *XXV Всероссийская ежегодная конференция “Солнечная и солнечно-земная физика – 2021”*, Санкт-Петербург, 4–8 октября 2021 г. <https://doi.org/10.31725/0552-5829-2021-249-252>

УДК 550.385.4

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИТ НА СТАНЦИИ ВЫХОДНОЙ (2012–2018)

© 2023 г. Д. А. Шевелева^{1, *}, С. В. Апатенков^{2, 1}, Я. А. Сахаров³, В. Н. Селиванов⁴, Е. И. Гордеев¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Харбинский Политехнический Университет, Харбин, Китай

³Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

⁴Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

*st035310@student.spbu.ru

Поступила в редакцию 12.03.2022 г.

После доработки 30.06.2022 г.

Принята к публикации 01.09.2022 г.

В работе исследовались 140 событий с наибольшими амплитудами геоиндуцированных токов (ГИТ) на станции Выходной (65 $MLat$) зарегистрированные в 2012–2018 гг. Показаны отличия параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов от типичных значений. Видны характерные увеличения скорости солнечного ветра и динамического давления, пониженная B_z компонента ММП. Существенно сдвинуты от обычных значений индексы Kp , AE , AL , Dst , а также скорость роста (падения) Dst/dt . Проанализирована связь с ударными волнами в солнечном ветре.

DOI: 10.31857/S0023420623010053, EDN: FHVPGT

ВВЕДЕНИЕ

Геоиндуцированные токи (ГИТ) появляются в протяженных проводящих объектах, таких как линии электропередач, при сильных вариациях магнитного поля Земли. Такие наземные магнитные возмущения вызваны изменяющимися ионосферными и магнитосферными токами [5, 7]. Несмотря на продолжительные исследования ГИТ, пока нет работ, которые опираются на большую статистику наблюдений, в частности из-за недоступности однородных непрерывных наблюдений ГИТ до недавнего времени. Из недавних работ можно отметить ряд статистических исследований: определение типов солнечного ветра при больших ГИТ [3], статистика параметров солнечного ветра и Kp индекса при больших производных наземного магнитного поля [1], исследование изолированных магнитных возмущений в ночном секторе [2].

ПОСТАНОВКА ЦЕЛИ И ЗАДАЧ

Целью нашей работы было выяснить характерные особенности магнитосферы и параметры солнечного ветра для событий с большими ГИТ, зафиксированными на станции Выходной в авроральных широтах. Задачи исследования: определить, при каких параметрах солнечного ветра

(давление, скорость, B_z) и геомагнитных индексов (AE , AL , Kp , Dst) создаются большие ГИТ; проверить предположение о том, что большие ГИТ могут быть вызваны ударными волнами; определить время появления ГИТ по индексу Dst , то есть, в какую фазу магнитных бурь обычно фиксируется ГИТ.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Измерения ГИТ, используемые в данной работе, проводились на станции Выходной [6]. Станция Выходной расположена на Кольском полуострове, географические координаты 68.5 с.ш., 33 в.д., находится в авроральной зоне на 65 градусах магнитной широты. Токи измеряются в нейтральном трансформатора линии электропередач 330 кВ. Для исследования использовался список событий экстремальных ГИТ, за период с 2012–2018 гг. были выбраны часовые максимумы, всего 140 событий, амплитуды токов в этой выборке 17 А и более, максимум 140 А.

Для сравнения с параметрами солнечного ветра использовались данные из баз NASA <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>, <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/index.html/> (дата обращения 20.11.2022) [4]. Спутниковые измерения, большинство которых произведено в точке Лагранжа L1, снесены по времени к головной ударной волне, использова-

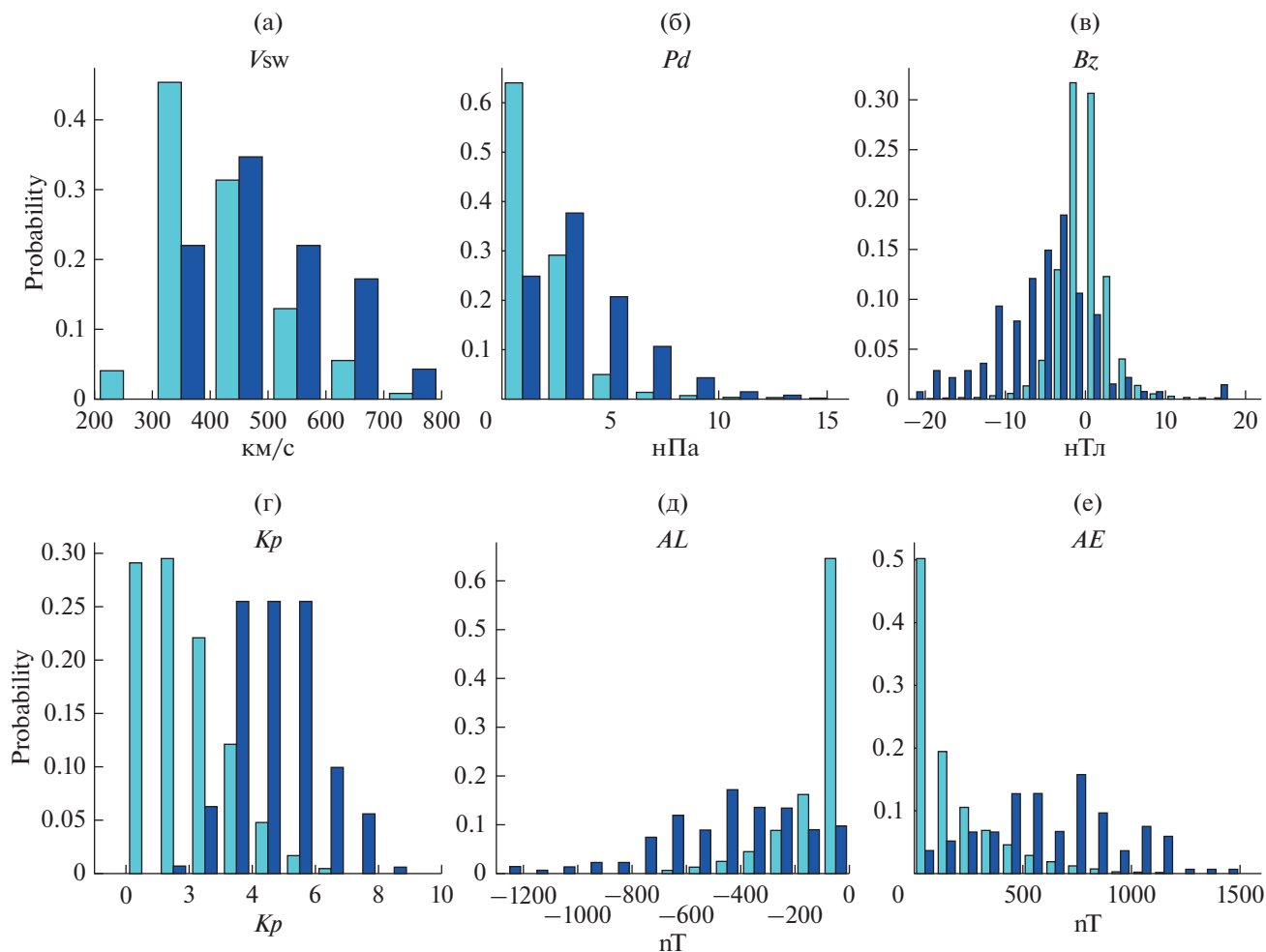


Рис. 1. Гистограммы с вероятностью наблюдения определенных параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов. Все данные OMNI 2012–2018 — голубой, события с экстремальными ГИТ — синий. (а) скорость солнечного ветра, (б) динамическое давление, (в) B_z компонента ММП, (г) Kp индекса, (д) AL индекса, (е) AE индекса. Вертикальная ось — степень вероятности.

ны часовые средние. Мы используем массовую скорость солнечного ветра (V), динамическое давление (Pd) и B_z компоненту межпланетного магнитного поля. Геомагнитные индексы: AE , AL , Dst (часовые данные), Kp индекс (трехчасовые значения). Кроме того, в работе использовался список ударных волн за период с 1995 по 2017 г. по [Oliveira D. et al., 2018] / <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/action/downloadSupplement?doi=10.1029%2F2018SW001880&file=swe20694-sup-0002-supplementary.txt> (дата обращения 20.11.2022)

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены гистограммы распределений по параметрам солнечного ветра и геомагнитным индексам. Голубым цветом показаны все значения из базы OMNI за 2012–2018 гг. (“номинальные”), 65000 часовых средних. Синими столбиками — значения, зафиксированные во время

экстремальных ГИТ на станции Выходной, 140 событий. На всех гистограммах видны существенные сдвиги распределений для ГИТ относительно номинальных в сторону больших значений, максимумы распределений сдвинуты на 100–200 км/с и 2–4 нПа, соответственно. Максимум распределения B_z сдвинут примерно на 5 нТл в сторону отрицательных значений. Дополнительно отметим, что более 85% событий из списка ГИТ наблюдались при отрицательной B_z .

Наиболее существенные сдвиги гистограмм видны в наземных индексах Kp , AL и AE индексах. Например, 85% событий списка ГИТ наблюдались при $Kp = 4$ и более, тогда как обычно интервалы с таким Kp составляют менее 10% всего времени наблюдений. Очевидно, что существенные магнитные возмущения, необходимые для ГИТ, как раз и отражены в геомагнитных индексах.

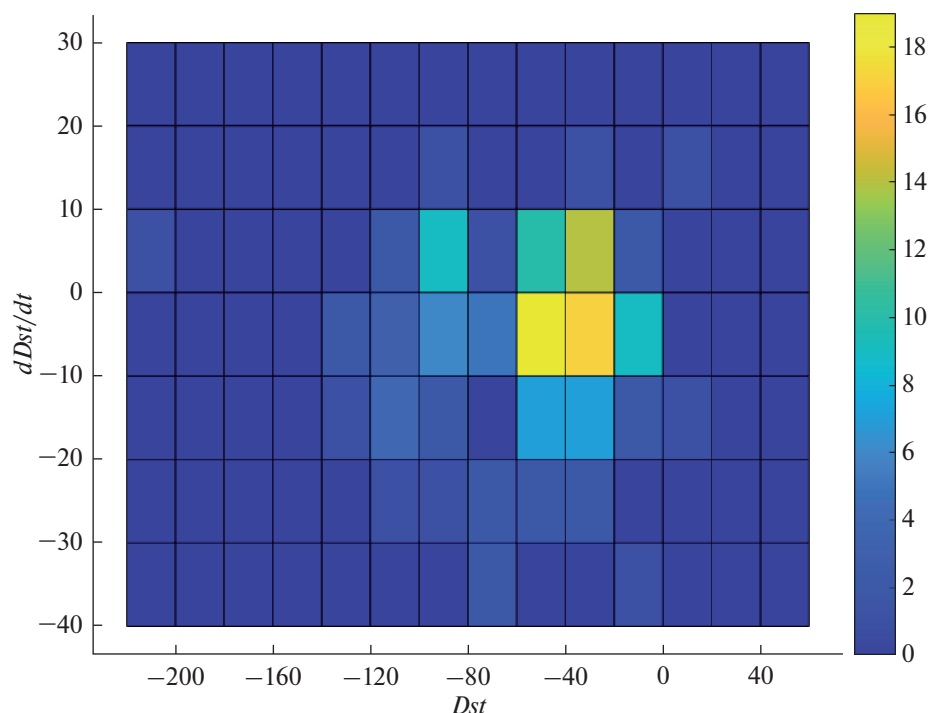


Рис. 2. Двумерная гистограмма с распределением 140 событий с большими ГИТ в пространстве параметров Dst и $dDst/dt$. Цветом показаны количества событий в ячейке.

Появление больших ГИТ по отношению к магнитным бурям и фазам бурь мы исследуем с помощью Dst индекса и производной Dst по времени, сосчитанной как разность Dst и предыдущего часового значения. Распределения в виде двумерной гистограммы показаны на рис. 2, цвета кодируют количество событий в ячейке параметров. Видно, что все большие ГИТ происходят либо при отрицательном Dst , либо при отрицательной $dDst/dt$. Основную часть событий можно формально отнести к магнитным бурям средней интенсивности, Dst в диапазоне $-20...-100$ нТл. Также доминируют отрицательные значения производной Dst , что говорит или о главной фазе бури или о локальных во времени усилениях активности. Все же около 30% событий происходят на фазе восстановления бурь, то есть при отрицательных Dst и положительной производной. Визуальный анализ записей Dst индекса показал, что только два события из 140 наблюдались одновременно или в течение первого часа бури (начала резкого падения Dst). Это создает положительные перспективы для систем предупреждений об экстремальных ГИТ.

Мы произвели поиск связи ударных волн (УВ), наблюдаемых в солнечном ветре и событий с экстремальными ГИТ. Всего одно событие из 140 наблюдалось в течение часа после УВ, и 13 событий в течение 12 последующих часов после УВ. Таким образом, в отличие от средних и экваториальных широт, УВ не являются основным источником

больших наземных производных магнитного поля и ГИТ в авроральных широтах.

Период наблюдений 2012–2018 гг. покрывает более половины 24-го солнечного цикла от максимума до минимума. Сравнение чисел Вольфа и частоты наблюдения событий ГИТ не показало связи. Годовые количества событий ГИТ как в максимуме цикла (2012–2014), так и на фазе спада (2015–2018) сравнимы.

ВЫВОДЫ

1. Распределения параметров солнечного ветра (V , Pd , Bz) и геомагнитные индексы (Kp , AL , AE , Dst) для событий с экстремальными ГИТ существенно отличаются от номинальных, наблюдаемых в 2012–2018 гг. Все гистограммы имеют существенный сдвиг в сторону больших значений (меньших для Bz и AL).

2. Основная часть событий с большими ГИТ происходит при отрицательном и убывающем Dst индексе.

3. В отличие от средних и экваториальных широт не выявлена связь между событиями ГИТ и межпланетными ударными волнами.

Работа проведена в рамках проекта РНФ № 19-77-10016.

Участие в исследовании В.Н. Селиванова и Я.А. Сахарова поддержано за счет гранта Россий-

ского научного фонда № 22-29-00413, <https://rscf.ru/project/22-29-00413/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Apatenkov S.V., Sergeev V.A., Pirjola R. et al.* Evaluation of the geometry of ionospheric current systems related to rapid geomagnetic variations. // *Annales Geophysicae*. 2004. V. 22(1). P. 63–72. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-63-2004>
2. *Engebretson M.J., Steinmetz E.S., Posch J.L. et al.* Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada: 2. Multiple-instrument observations // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2019. V.124. P. 7459–7476. <https://doi.org/10.1029/2019JA026797>
3. *Huttunen K.E.J., Kilpua S.P., Pulkkinen A. et al.* Solar wind drivers of large geomagnetically induced currents during the solar cycle 23 // *Space Weather*. 2008.V. 6. S10002. <https://doi.org/10.1029/2007SW000374>
4. *King J.H., Papitashvili N.E.* Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // *Journal of Geophysical Research*. 2005. V. 110. № A2. A02209. <https://doi.org/10.1029/2004JA010649>
5. *Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A. et al.* Geomagnetically induced currents: Science, engineering, and applications readiness. // *Space Weather*. 2017. V. 15. P. 828–856. <https://doi.org/10.1002/2016SW001501>
6. *Sakharov Y.A., Danilin A.N., Ostafiychuk R.M.* Registration of GIC in power systems of the Kola Peninsula // *The 7th international symposium on electromagnetic compatibility and electromagnetic ecology*. Saint-Petersburg. Russia. IEEE. 2007. P. 291–292. <https://doi.org/10.1109/EMCECO.2007.4371714>
7. *Weigel R.S., Klimas A.J., Vassiliadis D.* Solar wind coupling to and predictability of ground magnetic fields and their time derivatives // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2003. V. 108(A7). <https://doi.org/10.1029/2002JA009627>

УДК 524.1-352

ОБ ОСТАТОЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ

© 2023 г. В. Г. Янке¹ *, А. В. Белов¹, Р. Т. Гущина¹, П. Г. Кобелев¹, Л. А. Трефилова¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Россия

*yanke@izmiran.ru

Поступила в редакцию 26.02.2022 г.

После доработки 10.06.2022 г.

Принята к публикации 18.07.2022 г.

Исследована остаточная модуляция галактических космических лучей и ее энергетическая зависимость по данным трех типов наземных детекторов и по данным PAMELA, AMS-02 и Voyager 1/2. Получены количественные оценки остаточной модуляции в диапазоне жесткостей 4–41 ГВ. Показано, что остаточная модуляция примерно такая же по величине, как и модуляция, обусловленная циклом солнечной активности, что позволяет сделать некоторые выводы о модуляционных процессах в гелиосфере. Получен энергетический спектр остаточной модуляции. Проведено сравнение с результатами других авторов.

DOI: 10.31857/S0023420622060115, EDN: FHUEXI

1. ВВЕДЕНИЕ

Точные измерения спектра галактических космических лучей (ГКЛ) на орбите Земли с помощью космических экспериментов PAMELA [1] и AMS-02 [2], а в последующем и измерения межзвездного спектра на границе гелиосферы с помощью Voyager 1/2 [3] стали мощным стимулом для детального изучения модуляции КЛ в гелиосфере. Измерения на космических аппаратах PAMELA и AMS-02 проводятся в широком диапазоне жесткостей достаточно продолжительное время. Их совместное рассмотрение с наземными измерениями позволяет охватить 6 циклов солнечной активности с начала наземного мониторинга в 1950-х годах. В этом контексте рассмотрена проблема долговременной модуляции в гелиосфере, в частности, вопрос об остаточной модуляции космических лучей в периоды “спокойного” Солнца с целью понять и оценить модуляционные свойства гелиосферы.

Уже на раннем этапе исследований долговременных вариаций космических лучей ставился вопрос, насколько измеренная интенсивность в минимуме солнечной активности приближается к истинному значению интенсивности межзвездных космических лучей, т.е. есть ли еще остаточная модуляция, и какое может быть значение этой модуляции для частиц различных энергий.

Понятие остаточной модуляции введено еще в начале космической эры в связи с вопросом о разmere гелиосферы [4], который в настоящее время практически решен экспериментально. Вопрос

об остаточной модуляции сегодня больше связан с ролью отдельных областей гелиосферы и с модуляционной эффективностью гелиосферы в целом. Если в минимуме солнечной активности гелиосфера полностью заполняется практически немодулированными галактическими космическими лучами, то соответственно, остаточная модуляция должна быть незначительной. Важна количественная оценка такой модуляции.

С появлением экспериментальных данных о межзвездном спектре космических лучей появилась возможность непосредственно вычислить остаточную модуляцию и, тем самым, оценить скрытые модуляционные возможности гелиосферы при спокойном Солнце.

Ретроспективно остаточная модуляция рассматривалась в работах [5, 6], которые базировались на объединенных данных наблюдений на нейтронном мониторе Climax и на космогенных данных изотопного ¹⁰Be метода.

Исследования остаточной модуляции важны для решения нескольких взаимосвязанных задач: определения динамики модуляции в гелиосфере “спокойного” Солнца, оценки эффективности гелиосферы в целом и отдельных ее областей, численной оценки остаточной модуляции, проверки различных моделей межзвездных спектров нуклонных компонент на низких энергиях.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение спектра остаточной модуляции относительно постоянного базового уровня, определяемого межзвездным спектром.

Решению такой задачи благоприятствуют несколько обстоятельств. Во-первых, это прецизионные и продолжительные измерения с помощью магнитного спектрометра AMS-02 в том числе, высокоэнергичной части спектра частиц. Во-вторых, это выход *Voyager-1* и *Voyager-2* [7] за пределы гелиосферы, что позволило получить более определенные знания о межзвездном спектре различных элементов в диапазоне нижних энергий. В-третьих, проведение с помощью магнитного спектрометра PAMELA измерений спектра космических лучей на орбите Земли в широком диапазоне жесткостей, которые удачно пришлись на период минимума 24-го цикла солнечной активности (2009 г.). Это позволило провести калибровку используемых наземных детекторов (нейтронных мониторов, мюонных телескопов и детекторов стратосферного зондирования заряженной компоненты), результатом мониторинга которых, как правило, являются только вариации космических лучей за пределами магнитосферы Земли.

Задача настоящей работы:

1) Экспериментально определить величину остаточной модуляции (например, для минимума солнечной активности 2009) для детекторов (нейтронные мониторы, мюонные телескопы, стратосферное зондирование) с различными эффективными жесткостями регистрируемых частиц.

2) Определить энергетический спектр остаточной модуляции.

3) На основе всех имеющихся к настоящему моменту данных оценить время задержки отклика космических лучей относительно начала длительного периода ослабления магнитного поля гелиосферы (например, для маундеровского периода).

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

При выполнении работы использованы результаты мониторинга следующими детекторами:

Данные наземных детекторов на 1AU. Это данные мониторинга мировой сети нейтронных мониторов NM (<https://www.nmdb.eu/nest>, <http://cr0.izmiran.ru/common>), мюонных телескопов MT (<http://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/Archives/GMDN.php>) и данные стратосферного зондирования ионизирующей компоненты SS (https://sites.lebedev.ru/ru/DNS_FIAN). По данным сети нейтронных мониторов NM проведен GSM анализ для частиц с жесткостью 10 ГВ [8], результатом которого является спектр вариаций космических лучей $v_{1AU}(R)$ за пределами магнитосферы Земли относительно базового периода (в нашем случае 2009 г.). Для других детекторов (MT и SS), также необходимо перейти к вариациям и выполнить переход за пределы магнитосферы на

основе приемных коэффициентов нулевой гармоники.

Для проведения калибровки всех привлекаемых детекторов необходимо определить эффективные жесткости. Непосредственные вычисления эффективных жесткостей трудоемки и дают неоднозначные результаты, особенно для заряженной компоненты. Нами экспериментально проведена оценка эффективной жесткости R_{eff} методом сравнения вариаций данного детектора с вариациями нейтронной компоненты той же эффективной жесткости [9].

Так, в области максимума каскадной кривой в атмосфере для заряженной компоненты при стратосферных измерениях эффективная жесткость $R_{eff} = 4 \pm 0.15$ ГВ для станции Апатиты, $R_{eff} = 4 \pm 0.1$ ГВ для станции Мирный и $R_{eff} = 5.8 \pm 0.2$ ГВ для станции Москва. Эффективная жесткость мюонной компоненты $R_{eff} = 41 \pm 2.5$ ГВ (вертикальная компонента Nagoya.V). Эффективная жесткость регистрируемых частиц наземной сети нейтронных мониторов $R_{eff} = 10$ ГВ. Результаты GSM анализа в работе [10] были объединены с данными сети ионизационных камер Форбуша с 1933 г. (IC + GSM) с учетом приемных коэффициентов нулевой гармоники мюонной компоненты.

Данные PAMELA для калибровки наземных детекторов. Для калибровки наземных детекторов и определения базовых значений интенсивности незаменимыми оказались данные магнитного спектрометра PAMELA (<https://www.ssdsc.asi.it/pamela>, <https://tools.ssdsc.asi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp>) [11], период работы которого удачно пришелся на минимум 24-го цикла 2009 г. Для перехода к интенсивности космических лучей за пределами магнитосферы проведена калибровка детектора “сеть NM” по данным PAMELA за период 2009 г., т.е. вычислена интенсивность $J = J_{PAMELA}(v_{1AU} + 1)$, где все используемые величины зависят от жесткости частиц. Аналогичным образом проведена калибровка и других детекторов (MTиSS).

Долговременная стабильность магнитного спектрометра PAMELA и точность среднегодовых базовых значений интенсивности, как показано в работе [12], оказались достаточными для калибровки наземных детекторов. Кроме того, измерения магнитного спектрометра PAMELA перекрывают весь энергетический диапазон используемых нами детекторов. Можно было бы использовать результаты магнитных спектрометров стратосферного зондирования, но такие измерения проводятся только около 10 суток. Среднегодовые значения интенсивности по данным PAMELA для 2009 г. для различных R_{eff} приведены в табл. 1.

Данные LIS спектров. Определяющим для вычисления базовых значений интенсивности кос-

Таблица 1. Базовые (2009) значения интенсивности J_{IAU} , калиброванные по данным PAMELA и интенсивности J_{LIS} для различных R_{eff} , найденные по LIS спектрам

Модель спектра $p/(m^2 \text{ с ср ГВ})$	R_{eff} , ГВ						
	2.6	4.0 ± 0.1	5	5.8 ± 0.2	10 ± 0.3	20	41 ± 2.5
J_{IAU} (PAMELA, 2009)	579.0	250.0	149.9	106.0	26.9	4.18	0.57
J_{LIS} (C2016)	968.0	360.3	209.2	143.7	33.2	4.65	0.60
$\Delta = J_{IAU}/J_{LIS} - 1$, %	-40.2	-30.6	-28.3	-26.2	-19.0	-10.1	-4.5
J_{LIS} (B2019)	1184.4	408.8	227.7	152.6	33.2	4.67	0.60
$\Delta = J_{IAU}/J_{LIS} - 1$, %	-51.1	-38.8	-34.2	-30.5	-19.1	-10.4	-4.7
J_{LIS} (B2020)	1042.2	363.4	206.7	140.7	32.6	4.6	0.58
$\Delta = J_{IAU}/J_{LIS} - 1$, %	-44.4	-31.2	-27.5	-24.7	-17.6	-9.3	-2.7
$\langle \Delta \rangle \pm (\text{sys})$, %	-40 $\pm 0.3 \pm 5$	-30 $\pm 0.3 \pm 4$	-28 $\pm 0.3 \pm 3$	-26 $\pm 0.3 \pm 3$	-19 $\pm 0.4 \pm 2$	-10 $\pm 0.5 \pm 2$	-4.0 $\pm 0.7 \pm 2$

мических лучей за пределами гелиосферы для различных детекторов является локальный межзвездный спектр LIS. Существуют десятки моделей межзвездных спектров космических лучей, построенных при разных предположениях. Мы использовали только модели LIS, которые опирались на экспериментальные данные *Voyager-1* (<https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/science/data-access>, <https://voyager.jpl.nasa.gov>) для нижнего диапазона жесткостей (<1 ГВ) и AMS-02 (<https://lpsc.in2p3.fr/crdp>) для верхнего диапазона жесткостей (>100 ГВ). Модуляцией частиц верхнего диапазона жесткостей пренебрегалось, и поэтому можно было привлечь магнитные спектрометры на орбите Земли. Нами рассматривались следующие LIS спектры (в наших обозначениях): V2015, C2016, B2019 и B2020, согласно работам [13–16] соответственно.

На рис. 1 проведено сравнение двух моделей LIS жесткостных спектров C2016 [14] и B2019 [15] для протонов и ядер гелия. Показаны также экспериментальные данные *Voyager-1* и данные AMS-02high в верхней части спектра жесткостей, для которой модуляцией можно пренебречь. Для иллюстрации приведены также модулированные значения AMS-02 (<https://www.ssdc.asi.it/ams>). На рис. 1 стрелками обозначены участки спектра, характерные для рассматриваемых нами детекторов — SS, GSM, MT. Важно, что интересующая нас область жесткостей находится в районе спектра, который получен интерполяцией, и в этой области можно ожидать больших неопределенностей. На нижней панели приведены отношения для спектров J_{C2016}/J_{B2019} и их зависимость от жесткости; невязка в крайних участках спектра достигает 10%. Значения интенсивностей J_{LIS} для различных значений R_{eff} по данным нескольких LIS спектров также приведены в табл. 1.

3. МЕТОД ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Вариации можно определить относительно выбранного базового периода интенсивности космических лучей $J_{Base} = J_{IAU}$ (обычно максимума интенсивности). В этом случае вариация определяется как

$$v = J/J_{IAU} - 1. \quad (1)$$

Напомним, что J это калиброванная интенсивность космических лучей за пределами магнитосферы.

Вариации можно определить также относительно немодулированной интенсивности локального межзвездного спектра J_{LIS}

$$v_{LIS} = J/J_{LIS} - 1. \quad (2)$$

В (1) и в (2) интенсивность определена для одной заданной жесткости частиц. Вариации v и v_{LIS} относительно разных баз можно связать методом преобразования баз.

Действительно, исключая J из (1) и (2), получим $J_{LIS}(v_{LIS} + 1) = J_{IAU}(v + 1)$.

Откуда

$$v_{LIS} = \frac{J_{IAU}}{J_{LIS}}(v + 1) - 1 = v + \Delta(1 + v), \quad (3)$$

где остаточная модуляция относительно LIS уровня определяется как

$$\Delta = J_{IAU}/J_{LIS} - 1. \quad (4)$$

Для частиц 10 ГВ (см. табл. 1) $\Delta = 26.9/33.2 - 1 = -19.0\%$.

Базовые значения для каждого детектора определялись как среднегодовые для 2009 г. Значения интенсивностей J_{IAU} и J_{LIS} для различных значений R_{eff} по данным нескольких LIS спектров приведены в табл. 1.

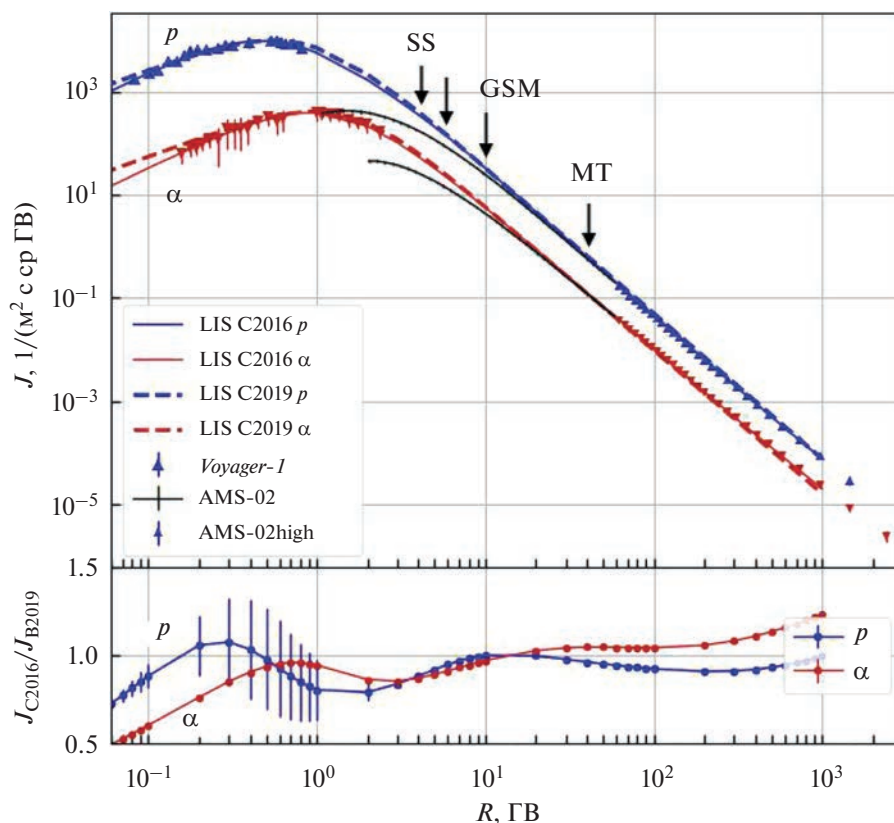


Рис. 1. Сравнение двух моделей LIS спектров C2016 [14] и B2016 [15] (верхние панели) и их отношения (нижние панели). Показаны также данные *Voyager-1* и AMS-02high, на основе которых спектры были получены.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные результаты для различных R_{eff} и нескольких моделей LIS спектров сведены в табл. 1, в которой даны значения интенсивностей J_{LIS} и J_{IAU} и значения остаточной модуляции в соответствии с выражением (4).

Для двух типов детекторов остаточная модуляция показана также на рис. 2 и рис. 3. На каждом рисунке приведены временные изменения вариаций космических лучей относительно базового периода 2009 г. Для всех минимумов у кривых указаны относительные вариации (в данном случае относительно базового периода 2009 г.). Так, для эффективной жесткости 10 ГВ относительные вариации оцениваются в несколько процентов, что согласуется с работами [17, 18].

На рисунках показан также модуль остаточной модуляции Δ . Такие оценки проведены для нескольких моделей LIS спектров, как это следует из табл. 1, но на рис. 2 и рис. 3 приведен результат только для LIS спектра C2016 [14].

Анализ модуляции космических лучей в геиосфере показал, что даже в период наиболее спокойного Солнца (например, 2009 г.) остаточная модуляция существенна.

Так, для частиц с эффективной жесткостью 10 ГВ остаточная модуляция (последняя строка табл. 1 и рис. 2) достигает $|\Delta| = 19 \pm 0.4(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})\%$, что примерно равно модуляции при переходе от минимума к максимуму солнечной активности. Для частиц с эффективной жесткостью 4.0 ГВ остаточная модуляция (последняя строка табл. 1 и рис. 3) достигает $|\Delta| = 30 \pm 0.3(\text{stat}) \pm 4(\text{sys})\%$, что также примерно равно модуляции при переходе от минимума к максимуму солнечной активности. Это справедливо для всех жесткостей. Так для максимальной рассматриваемой нами жесткости 41 ГВ (мюонный телескоп) в период спокойного Солнца остаточная модуляция космических лучей равна $|\Delta| = 4 \pm 0.7(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})\%$, что также сравнимо с модуляцией от минимума к максимуму солнечной активности. Из этого следует, что Солнце в своей самой активной фазе способно модулировать космические лучи относительно спокойного периода так же, как спокойное Солнце способно модулировать локальный межзвездный спектр.

Полученные значения остаточной модуляции в широком диапазоне жесткостей позволяют сформировать энергетический спектр остаточной модуляции, который представлен на рис. 4.

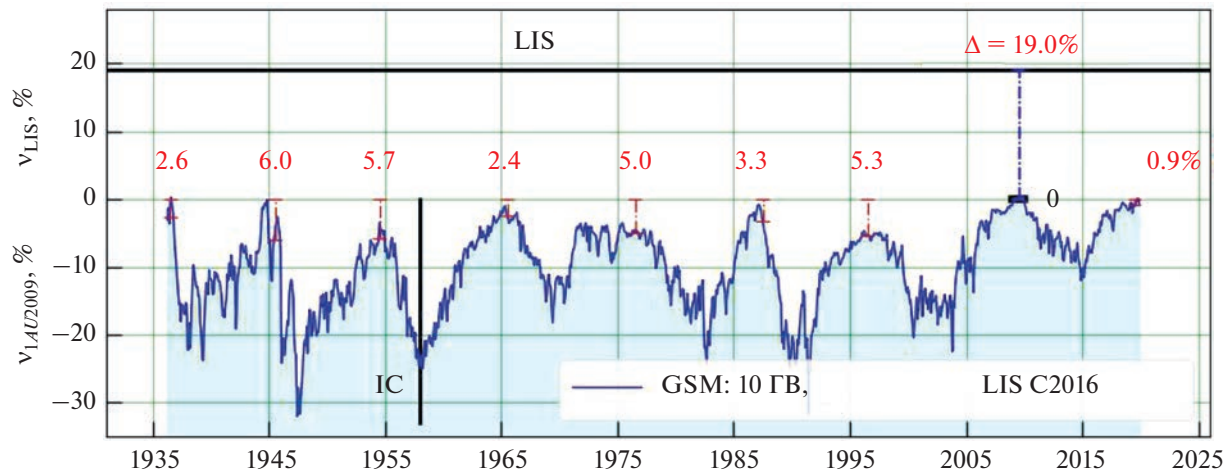


Рис. 2. Остаточная модуляция для эффективной жесткости 10 ГВ.

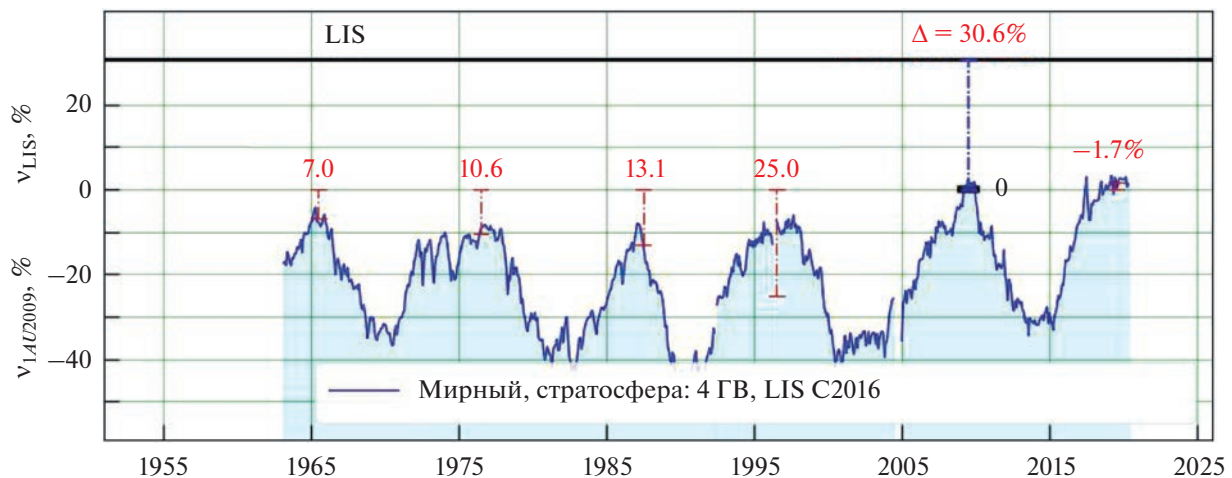


Рис. 3. Остаточная модуляция для эффективной жесткости 4 ГВ (стратосферные измерения, Мирный, Антарктида).

Легко видеть, что этот спектр степенной с переменным показателем, меняющимся от 1 до 2 для энергий от 4 до 40 ГэВ. Очень удачным может оказаться спектр вида $\Delta = \exp(-kR^\alpha)$.

Для жесткости 10 ГВ (нейтронные мониторы) для периода 2009 г. полученная нами оценка остаточной модуляции $19 \pm 2\%$ находится в согласии с работами [19]. Эти работы базировались на объединенных данных нейтронного монитора Climax с космогенными данными по изотопу ^{10}Be . Для современной эпохи авторами получено значение остаточной модуляции 18%, что отмечено нами на рис. 5. Совместные данные показывают, что остаточная модуляция в минимумах солнечных циклов неуклонно увеличивалась (т.е. интенсивность космических лучей уменьшилась) с 5% в минимуме Spörer в 15 веке до 18% в настоящее вре-

мя. Монотонный рост остаточной модуляции — постоянное свойство интенсивности галактических космических лучей на Земле на протяжении последних 400 лет. Это, видимо, свидетельствует о долгосрочном изменении магнитного поля на орбите Земли между 15-ым и 21-ым веком, которое, по оценке работы [19], увеличилось с 0.5 до 5 нТ. Это, к сожалению, зависимая оценка, поскольку она базировалась на данных об интенсивности космических лучей на орбите Земли. Такие результаты были получены также в работе [20].

Один из примеров возможного влияния внешних областей рассмотрен в работе [21], в которой приводятся аргументы в пользу гипотезы того, что в периоды низкой солнечной активности существенное влияние на галактические космические лучи оказывает так называемое внешнее электрическое поле гелиосферы, обусловленное

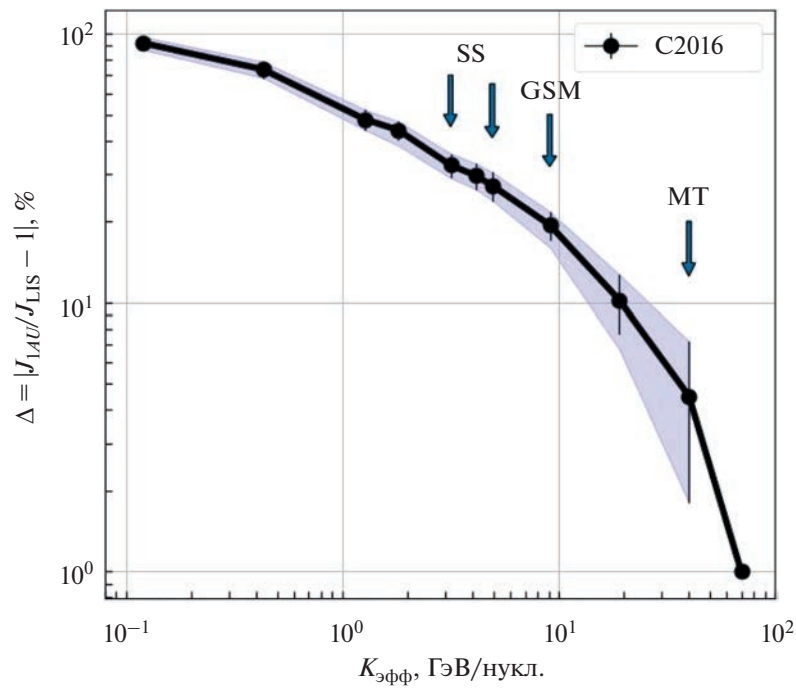


Рис. 4. Энергетический спектр остаточной модуляции для модели LIS спектра [14].

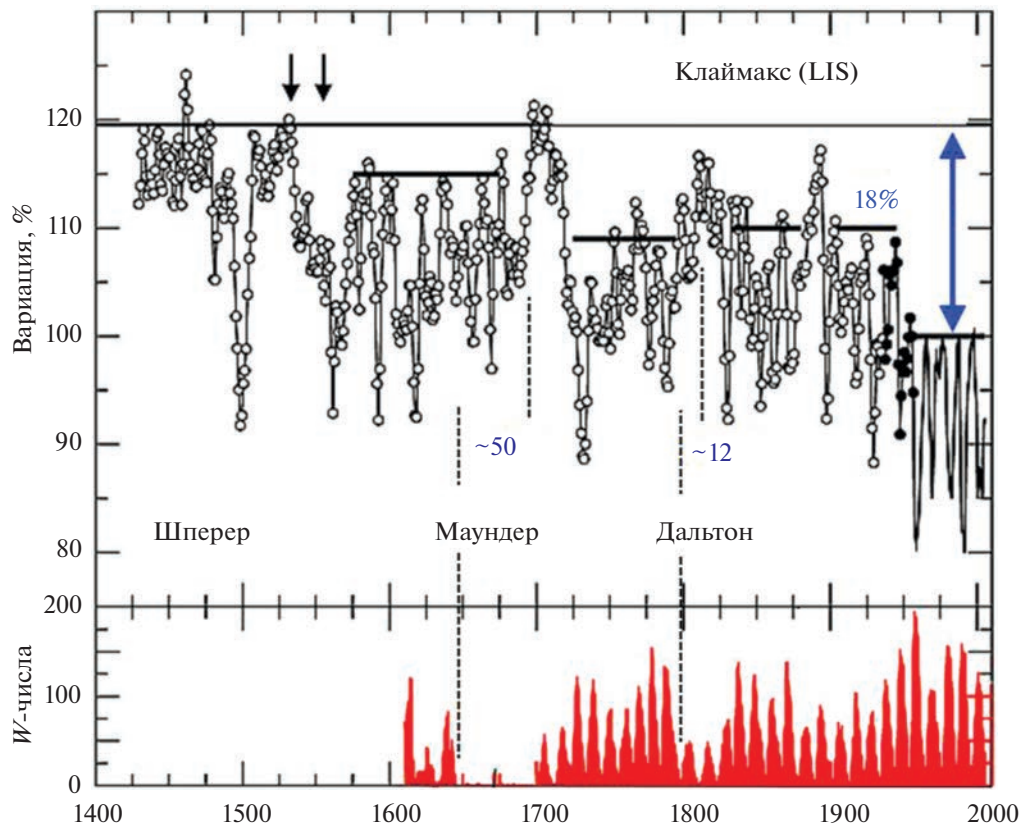


Рис. 5. Оцененные (1428–1954 гг.) и наблюдаемые (1951–2005 гг.) вариации нейтронной компоненты. Стрелки показывают интервал в 22 года [19]. Отмеченная нами задержка приведена в годах.

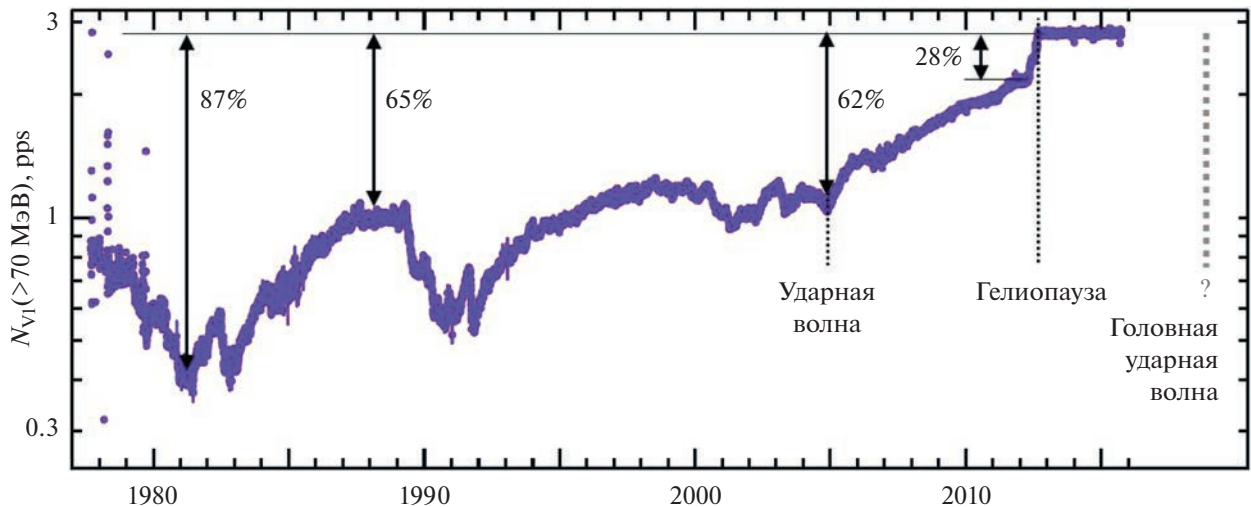


Рис. 6. Временная зависимость интенсивности частиц энергией >70 МэВ по данным *Voyager-1* [23]. Оценка остаточной модуляции в ключевых точках траектории *Voyager-1*.

крупномасштабной структурой объемных электрических зарядов внутри нее. Для учета этого предложено включить в рассмотрение дополнительную (так называемую внешнюю) модуляцию на пути из той области гелиосферы, где ГКЛ не модулированы, до ее границы. Граница модуляции должна охватывать все области пространства, где происходит какое-либо воздействие гелиосферных магнитных и электрических полей на ГКЛ.

Также не исключена возможность пересоединения высокоширотных силовых линий гелиомагнитосферы и галактического магнитного поля [22]. Там, где знаки полей противоположны, магнитное поле ослабевает, и наоборот.

Можно задаться вопросом об инерционности гелиосферы, т.е. о том, через какое время космические лучи межзвездного спектра заполняют всю гелиосферу после достижения солнечной активностью минимальных значений. Маундеровский минимум длился с 1645 по 1715 гг., а интенсивность космических лучей достигла LIS уровня [19] только через ~ 50 лет после начала маундеровского минимума, как это видно из рис. 5. Следовательно, солнечная система освобождается от влияния маундеровского минимума с задержкой в 50 лет. Минимум Дальтона длился с 1790 по 1830 гг., а интенсивность космических лучей достигла локального максимума примерно через 12 лет.

Исходя из значений остаточной модуляции, можно рассмотреть две возможности реализации радиальной зависимости коэффициента диффузии.

При активном Солнце, коэффициент диффузии $K \sim r$. Тогда модуляция $M \sim \ln(r)$ и при скорости солнечного ветра V_{SW} согласно модели Паркера градиент $dJ/dr = \frac{V_{SW}}{K_0} J(r) \propto r^{-1}$, т.е. модуля-

ция в основном происходит в ближней гелиосфере. При спокойном Солнце коэффициент диффузии $K = \text{const}$. Тогда модуляция линейна $M \sim r$ и $\text{grad}(J) \approx 1\%/AU$. Модуляция происходит во всей гелиосфере, и, следовательно, вычисленная остаточная модуляция реально достижима.

Но происходит ли остаточная модуляция во всей гелиосфере? Прямые измерения *Voyager-1* и *-2* свидетельствуют о том, что большая часть остаточной модуляции происходит между ударной волной, ограничивающей сверхзвуковое течение солнечного ветра, и гелиопаузой. Это видно на рис. 6, где приведена скорость счета канала с преобладанием протонов >70 МэВ (с некоторой долей электронов с энергией >15 МэВ) по маршруту *Voyager-1* [23]. Видно, что модуляция за ударным фронтом сравнима с модуляцией от максимума к минимуму в 80-е годы. На это есть теоретические соображения: за фронтом ударных волн возмущенность среды увеличивается, происходит более сильное рассеяние и, значит, более сильная модуляция.

ВЫВОДЫ

1) Анализ модуляции космических лучей в гелиосфере показал, что даже в период спокойного Солнца (2009) остаточная модуляция существенна для всего диапазона рассматриваемых жесткостей:

$\Delta = 30 \pm 0.3(\text{stat}) \pm 4(\text{sys})\%$ для частиц 4.0 ГВ (высокоширотные стратосферные измерения); $\Delta = 19 \pm 0.4(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})\%$ для частиц 10 ГВ (нейтронные мониторы, GSM) и $\Delta = 4 \pm 0.7(\text{stat}) \pm 2(\text{sys})\%$ для эффективной жесткости 41 ГВ (мюонный телескоп Nagoya.V).

2) Энергетический спектр остаточной модуляции — степенной с переменным показателем

спектра, меняющимся от -1 до -2 для энергий от 4 до 40 ГэВ.

3) Солнце в своей активной фазе способно модулировать космические лучи относительно спокойного периода, создавая модуляцию до 30%. Солнце в своей спокойной фазе модулирует локальный межзвездный спектр, создавая, примерно, такую же модуляцию в $(19 \pm 2)\%$. Прямые измерения *Voyager-1* и *-2* свидетельствуют о том, что остаточная модуляция формируется во всей внешней гелиосфере, однако большая ее часть происходит между ударной волной, ограничивающей сверхзвуковое течение солнечного ветра, и гелиопаузой.

4) Полученная в работе остаточная модуляция $19 \pm 2.4\%$ для жесткости 10 ГВ находится в хорошем согласии с работой [19], которая базировалась на объединенных современных данных нейтронного монитора Climax и на космогенных данных по изотопу ^{10}Be . Для современной эпохи авторами получена оценка остаточной модуляции в 18%, которая приближается к нулю в маундеровский период. Время задержки отклика космических лучей с жесткостью 10 ГВ относительно начала маундеровского минимума около 50 лет.

Авторы благодарны коллективам мировой сети станций космических лучей, обеспечивающим данные непрерывной регистрации нейтронной компоненты: http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf; благодарим базу данных NMDB (www.nmdb.eu). Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская национальная сеть станций космических лучей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* Time Dependence of the Proton Flux Measured by PAMELA during the 2006 July–2009 December Solar Minimum // *ApJ*. 2013. V. 765. № 2. P. 91–100. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/765/2/91>
2. *Aguilar M., Cavazonza L. Ali, Alpat B. et al.* (AMS-02 Collaboration) “Observation of the Identical Rigidity Dependence of He, C, and O Cosmic Rays at High Rigidities by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station” // *Phys. Rev. Lett.* 2018. 121, 051101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.251101>
3. *Stone E.C., Vogt R.E., McDonald F.B., Teegarden B.J., Trainor J.H., Jokipii J.R., Webber W.R.* Cosmic ray investigation for the Voyager missions: energetic particle studies in the outer heliosphere—and beyond // *Space Sci. Rev.* 1977. 21, 355–376.
4. *Nagashima K., Morishita I.* Long term modulation of cosmic rays and invariable electromagnetic state in solar modulating region // *Planet. Space Sci.* 1980. V. 28. № 2. P. 177–194. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(80\)90094-X](https://doi.org/10.1016/0032-0633(80)90094-X)
5. *McCracken K.G.* Long Term Changes in the Residual Modulation of the Galactic Cosmic Radiation. Proc. 30th ICRC, Mexico, July 3–11 2007.
6. *McCracken K.G., Beer J.* Long-term changes in the cosmic ray intensity at Earth // *J. Geophys. Res. Atmospheres*. 2007. V. 112. Iss. A10. Art. No. A10101. <https://doi.org/10.1029/2006JA012117>
7. *Stone E.C., Cummings A.C., Heikkilä B.C. et al.* Cosmic ray measurements from Voyager 2 as it crossed into interstellar space // *Nat Astro.* 2019. V. 3. P. 1013–1018. <https://doi.org/10.1038/s41550-019-0928-3>
8. *Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г. и др.* Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2018. Т. 58. № 3. С. 374–389. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
9. *Yanke V.G., Belov A.V., Gushchina R.T., Zirakashvili V.N.* The rigidity spectrum of the long-term cosmic ray variations during solar activity cycles 19–24. Proc. 26th Extended ECRS + 35th RCRC, Salt Lake City, USA // *J. Physics: Conference Series*. 2019. V. 1181. P. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012007>
10. *Belov A.V., Gushchina R.T., Oleneva V.A., Yanke V.G.* Large scale modulation: view from the Earth points // *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. V. 84. № 6. P. 40–51. <https://doi.org/10.1134/S1063778821130056>
11. *Maurin D., Dembinski H., Gonzalez J. et al.* Cosmic-ray database update: ultra-high energy, ultra-heavy, and antinuclei cosmic-ray data (CRDB v4.0) // *Universe*. 2020. V. 6. № 8. <https://doi.org/10.3390/universe608010005>
12. *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. сер. физ.* 2021. Т. 85. № 9. С. 1347–1350. <https://doi.org/10.31857/S0367676521090040>
13. *Vos E.E., Potgieter M.S.* New Modeling of Galactic Proton Modulation during the Minimum of Solar Cycle 23/24 // *Astrophys. J.* 2015. V. 815. P. 119. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/815/2/119>
14. *Corti C., Bindi V., Consolandi C., Whitman K.* Solar modulation of the local interstellar spectrum with Voyager 1, AMS-02, PAMELA and BESS // *Astrophys. J.* 2016. V. 829. P. 8–17. <https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/1/8>
15. *Bisschoff D., Potgieter M.S., Aslam O.P.M.* New very local interstellar spectra for electrons, positrons, protons and light cosmic ray nuclei // *Astrophys. J.* 2019. V. 878. № 1. P. 59–67. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1e4a>
16. *Boschini M.J., Della Torre S., Gervasi M. et al.* Inference of the Local Interstellar Spectra of Cosmic Ray Nuclei $Z \leq 28$ with the GALPROP–HELMOD Framework // *Astrophys. J.* 2020. V. 250. № 2. P. 27–57. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aba901>
17. *Thomson D.M.* The residual cosmic ray modulation at the 1954 solar minimum // *Planetary and Space Sci.*

- ence. 1972. V. 20. № 12. P. 2196–2197.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(72\)90073-6](https://doi.org/10.1016/0032-0633(72)90073-6)
18. *Gushchina R.T., Belov A.V., Eroshenko E.A. et al.* Cosmic Ray Modulation during the Solar Activity Growth Phase of Cycle 24 // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. V. 54. № 4. P. 430–436.
19. *McCracken K.G.* Heliomagnetic field near Earth, 1428–2005 // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. P. A09106.
<https://doi.org/10.1029/2006JA012119>
20. *Caballero-Lopez R.A., Moraal H., McCracken K.G., McDonald F.B.* The heliospheric magnetic field from 850 to 2000 AD inferred from ^{10}Be records // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. P. A12102.
doi: 10.1029/2004JA010633
21. *Крайнев М.Б., Калинин М.С.* Аргументы в пользу влияния внешнего электрического поля гелиосферы на галактические космические лучи // *Изв. РАН. сер. физ.* 2003. Т. 67. № 10. С. 1439–1442.
22. *Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.Н., Скрипин Г.В.* Эффекты взаимодействия гелиомагнитосферы с галактическим полем в космических лучах // *Геомагнетизм и Аэрономия*. 1981. Т. 21. № 5. С. 923–925.
23. *Cummings A.C., Stone E.C., Heikkila B.C. et al.* Galactic cosmic rays in the local interstellar medium: voyager 1 observations and model results // *The Astrophysical J.* 2016. 831 : 18 (21pp). № 1.
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/831/1/18>

УДК 520.6.07

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛУНЫ АВТОМАТИЧЕСКИМИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

© 2023 г. М. Я. Маров*

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*marovmail@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.11.2021 г.

После доработки 01.09.2022 г.

Принята к публикации 13.09.2022 г.

Обсуждаются проблемы изучения и освоения Луны, представляющей первостепенный интерес для космогонии, планетологии и наук о Земле в контексте комплексного изучения Солнечной системы. Дан исторический обзор исследований Луны, основополагающий вклад в которые внесен советской лунной программой, выполненный при помощи автоматических аппаратов в первые десятилетия космической эры. Обзор приурочен к возрождению лунных исследований в рамках российской национальной космической программы. Рассматривается современное состояние знаний о Луне, в первую очередь ключевые вопросы о ее происхождении и ранней эволюции. Это имеет важнейшее значение для реконструкции основных процессов формирования всего семейства тел Солнечной системы, включая раннюю историю Земли, а также причины различных путей эволюции Земли и планет земной группы. На современном этапе актуальной задачей является освоение Луны как стратегического плацдарма на пути освоения человечеством космического пространства, создание элементов будущей лунной инфраструктуры с использованием местных природных ресурсов в потенциально наиболее востребованных полярных областях. Южный полюс является целью российских миссий *Луна-25* и *Луна-27* с обширной научной программой, которая призвана открыть многоцелевую программу с эффективным использованием робототехнических средств нового поколения. Эта программа предшествует российским планам пилотируемых полетов на Луну.

DOI: 10.31857/S0023420623010041, EDN: FHOVOZ

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых стратегических задач мировых космических держав в нынешнем столетии является детальное изучение и освоение Луны, опирающиеся на автоматические космические аппараты-роботы и пилотируемые экспедиции, с целью создания обитаемых лунных баз и последующего развертывания комплексной лунной инфраструктуры.

За полвека космических исследований накоплены обширные знания о природе естественного спутника Земли — морфологии и свойствах поверхности, происхождении и составе слагающих пород, окололунном космическом пространстве. Однако многие проблемы, касающиеся происхождения системы Земля–Луна, внутреннего строения Луны, ранних этапов эволюции остаются нерешенными. Их предстоит изучать одновременно с решением многочисленных прикладных задач, непосредственно связанных с новым этапом пилотируемых полетов на Луну и первыми шагами на длительном пути ее освоения с использованием местных сырьевых ресурсов.

Освоение Луны следует рассматривать как важнейший очередной шаг в развитии космонавтики, обещающий к тому же огромный политический и экономический эффект. О таких планах сообщают ведущие космические агентства. Наиболее амбициозными являются лунные стратегические цели США и Китая, предусматривающие начало освоения Луны с середины 2020-х гг. Американцы планируют вернуться на Луну спустя почти столетие после завершения программы *Apollo*, на этот раз мотивируемые не целями компенсировать политический ущерб от запуска первого советского ИСЗ и полета Юрия Гагарина, а намерением начать долговременную программу освоения Луны, что также имеет немаловажную политическую составляющую. Решать эту амбициозную задачу призвана объявленная НАСА программа *ARTEMIS*, включающая в себя тяжелую ракету (*SLS*) и лунный космический корабль *Orion*, с высадкой первой экспедиции на Луну предположительно в 2025 г. и последующим наращиванием полетов. Уже в этом десятилетии предусматривается осуществить несколько десятков запусков с Земли на Луну включая запуски

малых космических аппаратов на ретроградные лунные орбиты по программе *CAPSTONE*, автоматические посадочные аппараты с бурением, пять посадок с экипажем на поверхность Луны и создание первой лунной базы, а также начало разработки лунных ресурсов с участием частных компаний. Фактически это сигнал к запуску новой лунной гонки — на этот раз за создание средств постоянного присутствия на Луне. Луна и астероиды могут стать в перспективе важными источниками внеземного вещества для восполнения истощаемых запасов ряда полезных ископаемых на Земле.

Советский Союз внес основополагающий вклад в исследования космического пространства, запустив первый искусственный спутник Земли, первого человека в космос, положив начало полетам к Луне и планетам Солнечной системы, добившись многих выдающихся научных результатов [1]. На современном этапе Россия должна занимать подобающее ей достойное место в космосе, в том числе, не оставаться в стороне от амбициозных лунных планов США, Европы, Китая, четко обозначив свои намерения присутствия на Луне уже в ближайшей перспективе. Эта стратегическая задача отражена в разработанной Концепции Российской комплексной программы исследования и освоения Луны, включающей перспективы исследования и использования лунных ресурсов с учетом практически неограниченного источника солнечной энергии на поверхности Луны. Она была рассмотрена в ноябре 2018 г. на совместном заседании Научно-технического совета Роскосмоса и Совета по космосу РАН и утверждена их совместным решением.

При выборе основных элементов рациональной программы освоения Луны Россия может опираться на имеющиеся конкурентные возможности в создании космических автоматов-роботов, разработке тяжелых ракет-носителей, развитии средств межорбитальной транспортировки и создании нескольких поколений пилотируемых станций. Следует при этом учитывать существующие технологические и экономические ограничения, потребные ресурсы и большие финансовые вложения, необходимые для длительного поддержания и развития такой программы.

Максимальное использование робототехнических средств с широким внедрением искусственного интеллекта рассматривается нами как технически и экономически наиболее приемлемая стратегия отечественной лунной программы. Такой подход служит альтернативой американской концепции с опорой на пилотируемые экспедиции. На первом этапе ключевым элементом в региональном изучении и выборе перспективных районов будущего освоения Луны должна быть геологоразведка, с постепенным наращиванием

программ исследований, для чего использование автоматов наиболее рационально. Исходя из этой концепции, участие космонавтов должно сводиться, в основном, к завершению строительно-монтажных и наладочных работ, проводимых робототехническими средствами на месте развертывания будущей лунной базы.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС

Исторически Луна, как ближайшее к Земле космическое тело, была наиболее полно исследована астрономами. Однако в детальном изучении свойств Луны и окололунного пространства определяющую роль сыграли полеты космических аппаратов.

Советский Союз первым начал полеты к Луне и добился выдающихся успехов, среди которых: фотографирование обратной стороны Луны, первая мягкая посадка на Луну, первый искусственный спутник Луны, автоматический забор и доставка на Землю образцов лунных пород, создание и длительное функционирование на лунной поверхности самодвижущихся аппаратов-роверов. Советские лунные космические аппараты можно разделить на семейства согласно их эволюции: от самых первых простых аппаратов для демонстрационных полетов с попаданием в Луну и ее облетом в 1958–1959 годах (аппараты серии *E-1 Луна-1–Луна-3*), первых модульных конструкций для мягкой посадки, кульминацией которых стали *Луна-9* и *Луна-13*, искусственных спутников Луны (*Луна-10 – Луна-12*) и до завершающей серии сложных автоматических станций для взятия проб грунта с доставкой на Землю и высадки луноходов (*Луна-15 – Луна-24*) с целью поддержки планировавшейся пилотируемой посадки на Луну. Благодаря модульной конструкции комплектовать эти модификации можно было сравнительно просто и быстро. Несмотря на сложность поставленных задач, они обеспечили доставку как первых образцов внеземного вещества, так и первых луноходов, а также создание двух орбитальных аппаратов.

Серия E-1 – E-3. Аппараты серии *E-1*, созданные в ОКБ-1 С.П. Королева, были небольшими с ограниченным составом научной аппаратуры. Они представляли собой простую конструкцию сферической формы, похожую на первый ИСЗ, с системой стабилизации вращением и несколькими антеннами (рис. 1). Шесть таких станций были запущены в течение 12 месяцев, в промежутке между сентябрем 1958 и сентябрем 1959 гг. Все они, кроме двух, были потеряны из-за неполадок с ракетами-носителями, кроме *Луны-1* и *Луны-2*. И хотя 4.I.1959 *Луна-1* не попала собственно в Луну, это был первый космический аппарат, достигший второй космической скорости — за два месяца до американского *Pioneer-4*. Кроме того, на

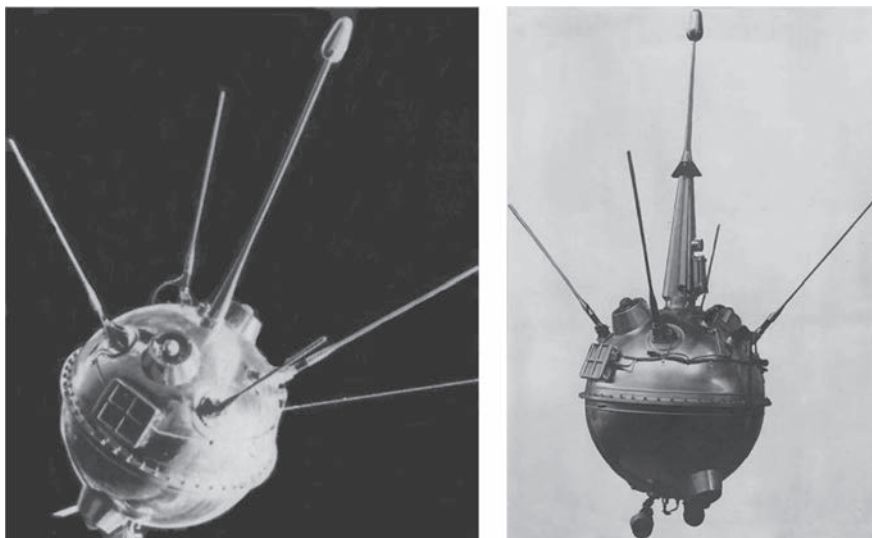


Рис. 1. *Луна-1,-2* (РКК “Энергия”).

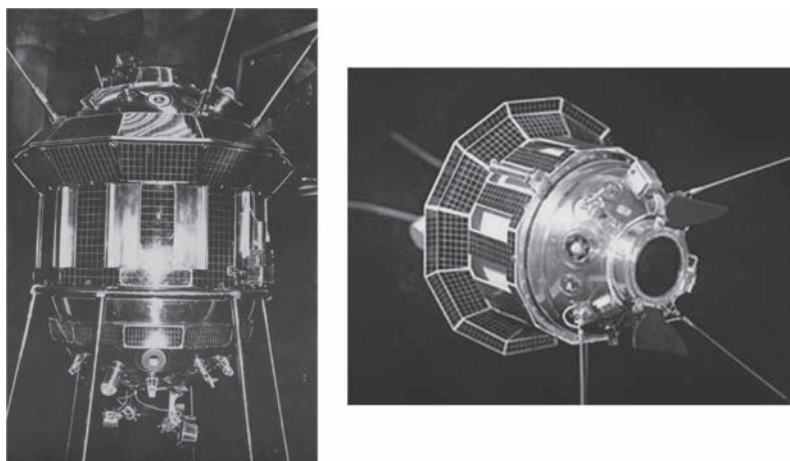


Рис. 2. *Луна-3* (РКК “Энергия”).

Луна-1 впервые был экспериментально обнаружен солнечный ветер и измерена его сила. *Луна-2* впервые 14.IX.1959 совершила соударение с Луной. Сам факт достижения Луны имел громадный эффект. Американцы восемь раз безуспешно пытались достигнуть Луны в 1958–1960 гг. Лишь один космический корабль, *Pioneer-4*, успешно стартовал с Земли и достиг второй космической скорости, но сильно отклонился от цели, пролетев мимо Луны.

В период 1959–1960 гг. были созданы лунные аппараты серий *E-2* и *E-3* (рис. 2). Они представляли собой второе поколение простых одномодульных конструкций с большей полезной нагрузкой [2]. В отличие от первых прямых запусков к Луне, они сначала выводились на сильно вытянутую эллиптическую орбиту, которая позволяла

облететь Луну с обратной стороны и ее сфотографировать, а оказавшись в зоне прямой видимости с Землей, передать полученные изображения. *E-2* была первой космической станцией, стабилизированной по всем трем осям для обеспечения фотосъемки Луны. В свою очередь, станция *E-3* была снабжена модифицированной системой ориентации и усовершенствованной фотокамерой. В период с начала октября 1959 г. и до конца апреля 1960 г. с помощью модифицированной ракеты-носителя *P-7* были запущены одна станция *E-2* и две станции *E-3*, которые, однако, были потеряны в результате аварий ракет-носителей. Успешно завершился полет еще одной станции *E-2*, ставшей *Луной-3* и передавшей первые снимки обратной стороны Луны [2], что стало настоящим триумфом советской космической программы (рис. 2).

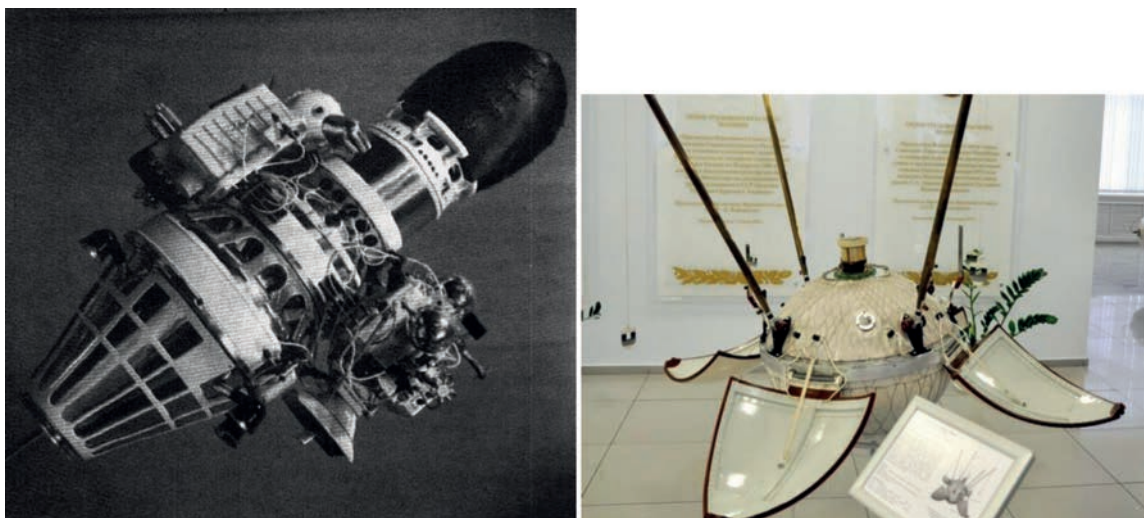


Рис. 3. Луна-9 (РКК “Энергия” и НПО Лавочкина).

Серия Е-6. Следующей задачей стала мягкая посадка на Луну, которая потребовала много усилий. В самом начале 1960-х создавались посадочный аппарат *Е-4* и орбитальный аппарат *Е-5*, но их быстро вытеснили более совершенные аппараты серии *Е-6*, также разработанные в ОКБ-1. Аппарат *Е-6* представлял собой модульную конструкцию, на которую можно было монтировать спускаемый или орбитальный аппарат. Их летные испытания продолжались с января 1963 по декабрь 1965 года, но ни в одном из одиннадцати запусков осуществить мягкую посадку на Луну не удалось.

Ситуация резко изменилась после передачи лунно-планетной тематики вместе с технической документацией и результатами экспериментальной отработки из ОКБ Королева во вновь созданное на базе легендарного авиационного КБ С.А. Лавочкина и завода 301 НПО Лавочкина. Его возглавил талантливый инженер, настоящий энтузиаст космических исследований Г.Н. Бабакин. За небывало короткий срок коллективом Г.Н. Бабакина было создано нескольких новых поколений автоматических космических аппаратов (полтора десятка за 6 лет!), что в нынешних условиях, при неизмеримо разросшейся бюрократии, представляется совершенно невероятным. История создания, конструкция этих лунно-планетных аппаратов и полученные результаты подробно изложены в работах [3, 4]. НПО Лавочкина провело ряд модификаций аппарата *Е-6* (ставшего *Е-6М*) и было немедленно вознаграждено успешным полетом *Луны-9* (рис. 3), которая 3.10.1966 совершила первую в мире мягкую посадку на Луну и передала на Землю панораму ее поверхности (рис. 4). Одновременно было доказано, что поверхность Луны достаточно твердая, а

не покрыта рыхлым пылевым слоем, в который мог бы провалиться посадочный аппарат. За *Луной-9* последовала *Луна-13*. Всего за 14 месяцев было создано также несколько версий орбитальных аппаратов и достигнуто рекордное число успешных миссий: шесть из десяти запусков *Е-6М*. После всего лишь одного неудачного испытательного запуска первой модели *Е-6С* на орбиту вокруг Луны вышел аппарат *Луна-10*, оснащенный приборами для исследования полей и частиц на окололунной орбите (рис. 5). В дальнейшем КА был доработан для решения задач орбитальной фотосъемки по программе *Е-6ЛФ*. Запуски аппаратов *Луна-11* и *Луна-12* также увенчались успехом, хотя в первом случае качественных изображений получить не удалось. Наконец, после еще одной модификации появился аппарат *Е-6ЛС*, и вслед за двумя его неудачными запусками последовал успешный полет орбитального аппарата *Луна-14*.

Аппараты 7К-Л1 “Зонд”. 1960-е годы прошлого столетия отмечены беспрецедентной лунной гонкой — острым соперничеством СССР и США за высадку человека на Луну. К великому сожалению, несмотря на огромные усилия и затраты, нам не удалось осуществить программу *Н1-Л3*, преследовавшую эту цель, и составить конкуренцию США с их программой *Apollo*. Случилось это по целому ряду причин, наиболее объективный анализ которых дан в книге “Ракеты и люди” [3].

Идея полета человека на Луну вынашивалась С.П. Королевым уже после запуска первых “лунников”, для чего вскоре начала создаваться трехмодульная конструкция корабля *Союз*. Она состояла из модуля поддержки, включающего в себя энергоресурсы, силовую установку, системы связи, навигации, и расходные материалы для

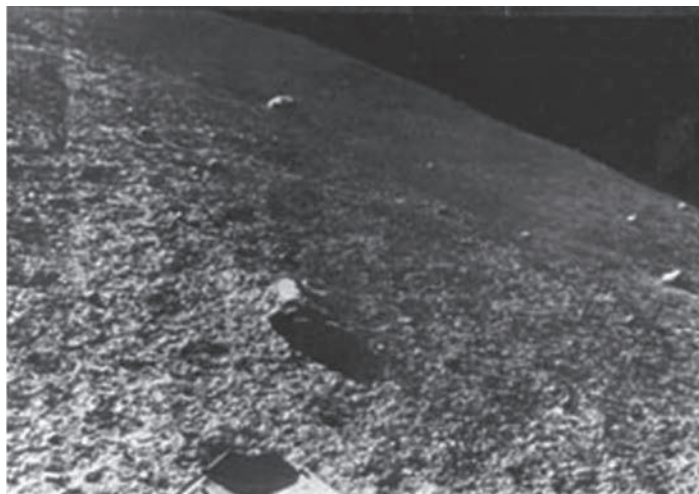


Рис. 4. Первая панорама лунной поверхности. *Луна-9*, 1966.

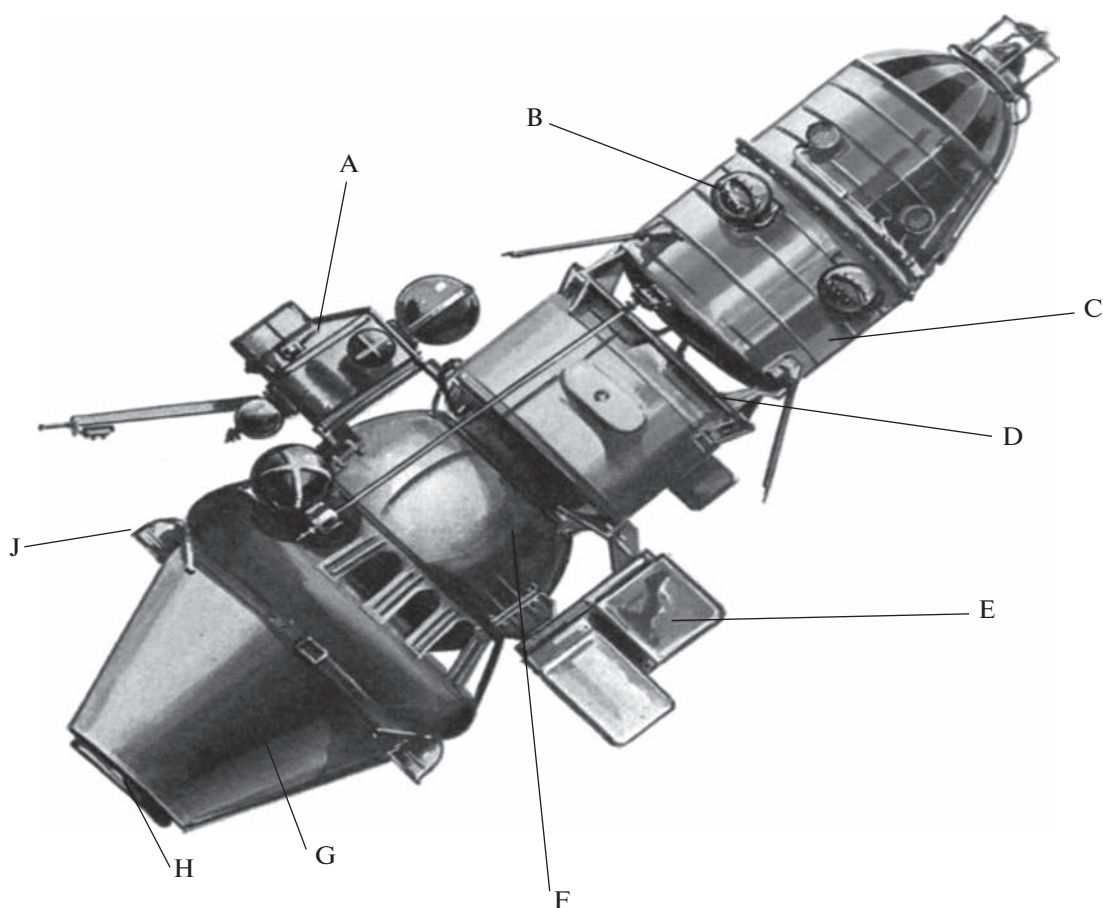


Рис. 5. *Луна-10* (НПО Лавочкина).

космонавтов; посадочного модуля для доставки космонавтов на орбиту и возвращения на Землю; а также обитаемый отсек большого объема с системами жизнеобеспечения, пригодный для длительного полета. В середине 1960-х эти космиче-

ские корабли пришли на смену обитаемым капсулам *Восток* и *Восход*, они пошли в серию, вполне надежны и до сих пор находятся в эксплуатации.

На основе *Союза* была создана орбитальная станция *7К-ЛОК (Л1)*, предназначенная для вы-



Рис. 6. Лунный орбитальный корабль (ЛОК) (РКК “Энергия”).

полнения операций на окололунной орбите. Идея всего проекта состояла в том, чтобы вывести на окололунную орбиту тяжелой ракетой *Н-1* орбитальный модуль *7К-ЛОК* вместе с посадочным модулем *ЛК* (комплекс *Н-1 ЛЗ*). Предполагалось кроме того, что *ЛОК*, выводимый к Луне мощным четырехступенчатым *Протоном*, совершит полет по окололунной орбите с двумя космонавтами на борту, как предшественник для подготовки посадки на Луну одного космонавта в совместном полете *ЛОК-ЛК* с использованием *Н-1* (рис. 6). *ЛК* успешно испытывался в автоматическом режиме при полетах на околоземной орбите.

Для подготовки пилотируемых окололунных полетов было произведено несколько запусков в автоматическом режиме *7К-ЛОК*, получивших название *Зонд*: первые два - на околоземной орбите, и девять других (в течение 1967–1970 гг.) — на характерное для лунных полетов расстояние, либо непосредственно по реальной окололунной орбите. Так, вернувшийся на Землю *Зонд-4* для простоты навигации совершил полет на лунную дистанцию, но в стороне от Луны, а аппараты *Зонд-5*–*Зонд-8* совершили полеты по окололунной орбите. *Зонд-4* разрушился при входе в атмосферу, у *Зонда-5* возникли значительные — но не фатальные — проблемы с бортовыми системами, а *Зонд-6* разбился при посадке за несколько недель до полета *Apollo-8*.

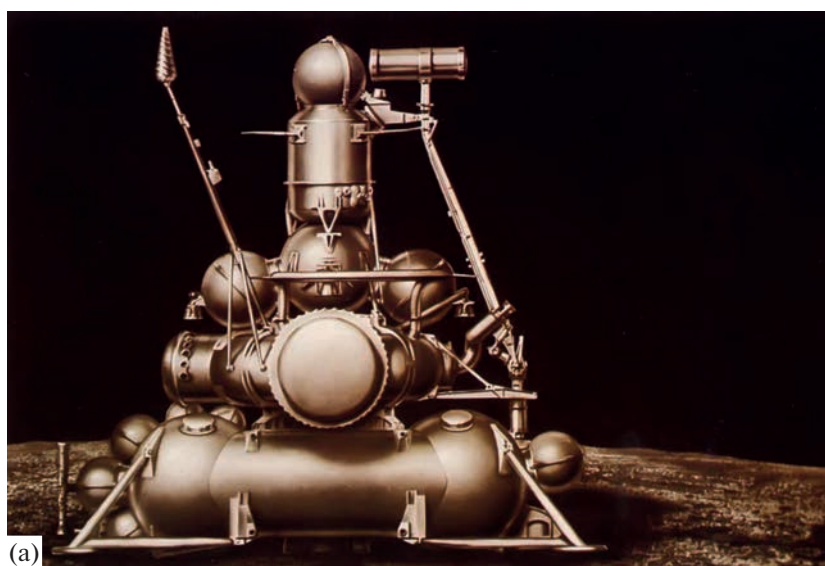
Серия Е-8. Лунная гонка с американцами была нами проиграна. Мы смогли, однако, противопоставить соперникам запуски нового поколения космических аппаратов серии *Е-8*, создание которых стало выдающимися техническими достижениями НПО Лавочкина [4, 5], осуществленными, к тому же, с минимальными затратами, несопоставимыми с программой *Apollo*.

Станции Е-8-5 для забора грунта. Базовый аппарат *Е-8* изначально создавался под луноход, разработка которого была начата еще в королев-

ском ОКБ-1 для поддержки лунной пилотируемой экспедиции, а когда стало ясно, что мы ее осуществить не сможем, конструкция была срочно модифицирована — уже в НПО Лавочкина — в самоходный автоматический аппарат и одновременно в космическую станцию *Е-8-5* для автоматического забора и доставки на Землю образцов лунного грунта с целью опередить высадку американских астронавтов на Луну и тем самым уменьшить международный резонанс от этого достижения.

Лунные аппараты серии *Е-8* [4, 5] были гораздо тяжелее и сложнее, поэтому для их запуска требовалась мощная ракета-носитель *Протон*. Особенно сложные задачи встали перед разработчиками *Е-8-5*. Сегодня, оглядываясь назад, следует подчеркнуть, что сам факт создания этих уникальных космических станций в столь короткие сроки и с высоким уровнем совершенства просто поразителен, как и умение россиян “просто сделать это”, забыв о трудностях, максимально использовать “то, что есть под рукой”, и способность решать многие вопросы буквально на ходу, во время, а порой и после монтажа.

Из одиннадцати запущенных станций *Е-8-5* успешными оказались *Луна-16*, *Луна-20* и *Луна-24*, причем *Луна-20* и *Луна-24* фактически представляли собой усовершенствованную модель *Е-8-5М* (рис. 7). Из трех запусков космических аппаратов *Е-8* успешными были *Луна-17* и *Луна-21* (*Луноход-1* и *Луноход-2*). Две дополнительные модели орбитальных аппаратов *Е-8* были доработаны до *Е-8ЛС* и совершили успешные полеты, известные как *Луна-19* и *Луна-22*. Поэтому окончательный послужной список аппаратов *Е-8* включает семь успешных полетов из шестнадцати. Особенно досадной была неудача с запуском *Луны-15*, запущенной 13.VII.1969, всего за 3 дня до *Apollo-11*, который 17.VII вышел на окололунную орбиту. Было проведено несколько коррекций орбиты *Луны-15*,



(a)



(б)



(в)

Рис. 7. Луна-16; а, б, в (НПО Лавочкина).

чтобы осуществить посадку в Море Спокойствия, но предположительно была недооценена роль лунных масконов, которые вызвали ряд проблем с контролем высоты. В результате маневр спуска не удался, и *Луна-15* разбилась, а на Луну первыми высадились американцы на *Apollo 11*.

Причина неудачи с *Луной-15* остается до сих пор до конца невыясненной.

Модификация базового аппарата *E-8* в космическую станцию *E-8-5* поставила разработчиков перед сложнейшими проблемами, в первую очередь, из-за ограничений на массу КА, которому предстояло взлететь с Луны и вернуться на Землю. Снабдить аппарат сложной и тяжелой систе-

мой управления, какой оснащались другие межпланетные космические станции, чтобы определять собственные координаты и осуществлять маневры коррекции курса на промежуточном участке траектории, оказалось невозможным. Было найдено оригинальное решение пассивного возврата аппарата с Луны на Землю путем выбора из небольшого набора траекторий таких, которые не требовали коррекции курса на промежуточном участке полета (рис. 76). Эти траектории были ограничены особой областью на Луне, геометрическое место точек на которой варьировалось в зависимости от времени года и момента старта при ограничениях на точность знания парамет-

ров лунного гравитационного поля и определение района посадки на Землю возвращаемой капсулы с грунтом (рис. 7в). С учетом большой погрешности вычисления эллиптической траектории задача обнаружения и поиска капсулы оказывалась чрезвычайно сложной даже при наличии радиомаяка. Тем не менее, даже в этом случае потребовались усилия, чтобы повысить грузоподъемность *Протона* примерно на 150 кг и обеспечить запуск космической станции.

Конструктивно посадочные модули аппаратов *Е-8* и *Е-8-5* и циклограммы их посадки на Луну были аналогичны, но сильно отличались от серии *Е-6* [4, 5]. Оба модуля были центрированы относительно четырех сферических топливных баков, соединенных друг с другом цилиндрическими секциями. Система посадки и двигатель монтировались снизу этой конструкции, а полезная нагрузка — сверху. Основное различие состояло в том, что аппарат *Е-8-5* был оснащен системой забора лунных образцов, парой телекамер для стереосъемки места забора и прожекторами для случая ночной посадки. Пандусы для съезда лунохода были заменены на тороидальный герметичный отсек, в котором находились система управления и приборы для операций на поверхности. Взлетная ракета была смонтирована наверху, а сам посадочный аппарат и его тороидальный отсек играли роль стартовой площадки (рис. 7а). Сферическая возвращаемая капсула была прикреплена к верхней части возвратной ракеты с двигателем тягой 18,8 кН, работавшим 53 с и сообщавшим космическому аппарату скорость 2,7 км/с, что обеспечивало взлет с поверхности Луны и выход на траекторию прямого попадания на Землю. Капсула (рис. 7в) представляла собой сферу диаметром 50 см и весом 39 кг, покрытую абляционным материалом для входа в атмосферу Земли на скорости около 11 км/с. Она состояла из трех секций: в верхней находился парашют площадью 10 кв. м и антенны радиомаяка, в средней — образцы лунного грунта, а в нижней — аккумуляторы и передатчики. Распределение массы обеспечивало аэродинамическую стабилизацию капсулы при входе в атмосферу.

Система забора лунных образцов (рис. 7а) состояла из подъемной штанги длиной 90 см с бурильным устройством на конце, которая могла осуществлять поступательные и вращательные движения для операций на лунной поверхности и для переноса образцов в возвратную ракету через боковой люк возвратной капсулы. Ее масса составляла 13,6 кг. Головка герметичного и термоизолированного бура длиной 417 мм и диаметром 26 мм с механизмом для ударно-вращательных движений представляла собой коронку с острыми зубцами, что позволяло осуществлять сверление как твердого, так и мягкого грунта. При скорости

500 об/мин требовалось 30 мин, чтобы заполнить внутреннюю часть бура длиной 38 см.

Эта конструкция великолепно сработала при запуске *Луны-16*, спустя более года после *Луны-15* и пяти промежуточных аварийных запусков по вине ракеты-носителя *Протон-К*. *Луна-16* доставила 101 грамм лунного вещества, и этот успех стал настоящим триумфом советской космической программы, продемонстрировавший колоссальные возможности космических роботов. Это подтвердили еще два успешных запуска аппаратов *Е-8-5М* (*Луна-20* и *Луна-24*), причем на *Луна-24* использовалась усовершенствованная буровая установка, способная проникать под поверхность Луны на глубину 2,5 м и при этом сохранять стратификацию залегания взятых образцов [4, 5].

Луна-24 стала последней космической станцией серии *Луна*, завершившей советскую лунную программу. Был изготовлен третий луноход, была создана еще одна космическая станция для доставки образцов лунного грунта, но в 1977 г. ракета-носитель, предназначавшаяся вначале для лунохода, была использована для запуска спутника связи, к тому же внимание переключилось с Луны на проект *5М* по доставке образцов пород с Марса. Позднее все лунные и марсианские программы были принесены в жертву успешным исследованиям Венеры. Тем не менее, надежная лунная ступень *Е-8* была модифицирована, и на ее основе создана автономная двигательная установка для космической станции *Фобос* 1988 года. А в дальнейшем она стала использоваться в качестве универсального разгонного блока *Фрегат* в составе ракет-носителей среднего и тяжелого классов *Союз-ФГ*, *Союз-2*, *Союз-3*, *Зенит-3SLБФ*, *Ангара-А3*.

Запуски автоматических станций *Луна-16*, *Луна-20* и *Луна-24* позволили получить выдающиеся научные результаты исследований вещества лунных пород из разных районов Луны в земных лабораториях (рис. 8). Грунт, взятый *Луной-16* в Море Изобилия, представлял собой изверженные магматические породы — темный порошкообразный морской базальт, аналогичный полученному *Apollo-12* в Океане Бурь. Образцы пород, доставленных *Луной-20* из горного района, оказались существенно отличными от морского грунта *Луны-16*. Они были гораздо светлее и содержали больше крупных частиц. Более половины вещества горных пород представляли собой анортозиты — древние горные породы семейства габброидов, состоящие в основном из полевого шпата. В двухметровой колонке лунного реголита, полученной *Луной-24* с сохранением стратификации пород, помимо отличий химического состава, были обнаружены напластования, явно указывающие на последовательность процессов их формирования. Методом диффузионной ИК-спек-

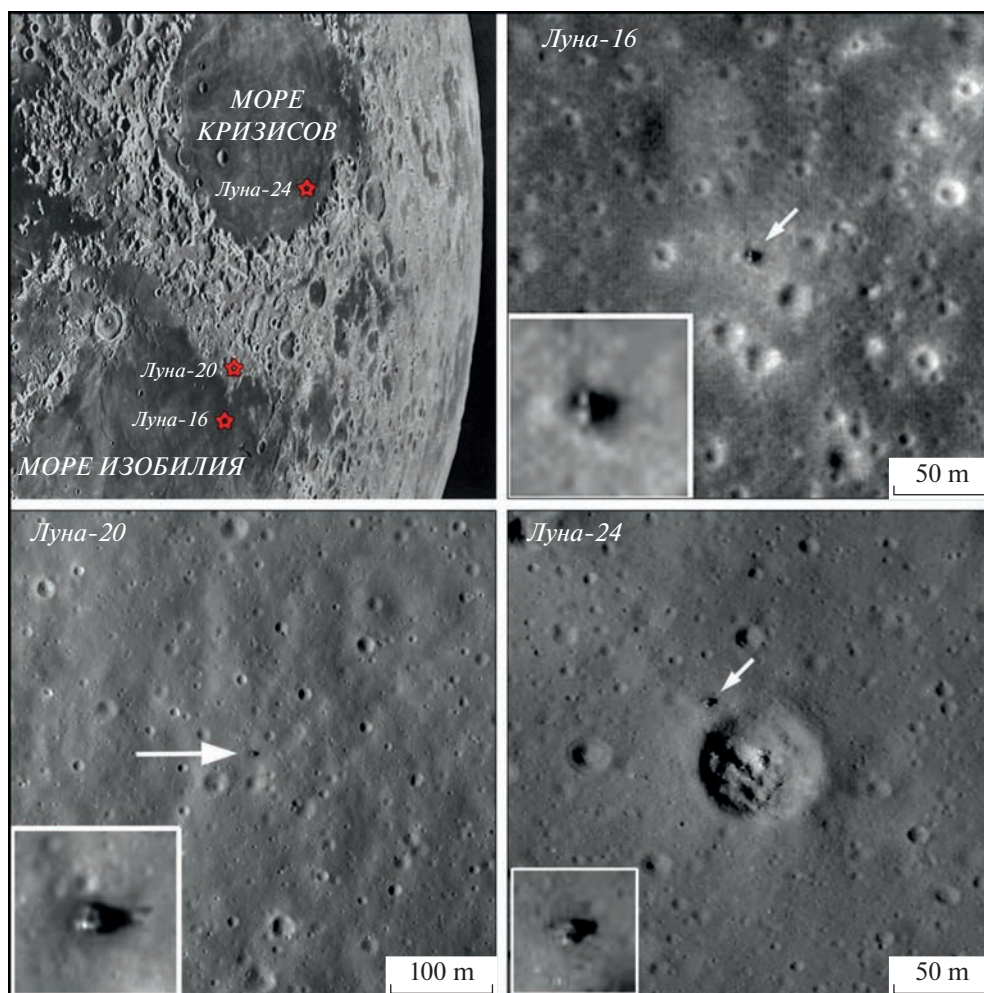


Рис. 8. Места посадок КА Луна-16, -20, -24 (Монтаж изображений LPO (NASA) А.Т. Базилевского).

троскопии в магматических породах морских базальтов было обнаружено заметное содержание воды ~ 0.1 вес. % [6]. Это, по существу, было одним из первых указаний на то, что Луна может быть не сухим, как считалось, а достаточно влажным телом, возможно со времени ее рождения (см. ниже). Изотопный анализ позволил провести датировку образцов и определить возраст лунных пород из горных и морских областей и лучше понять историю Луны. Наиболее полные космохимические исследования доставленного лунного вещества были проведены учеными Института геохимии и аналитической химии имени Вернадского (рис. 9) и одновременно образцы были переданы для физических и химических исследований целому ряду других организаций. Результаты исследований, продолжающихся до настоящего времени, были опубликованы в многочисленных изданиях. В 1971 году три грамма грунта, доставленного *Луной-16*, были обменены на три грамма грунта, взятого в ходе программы *Apollo 11* и три грамма грунта, взятого *Apollo 12*.

Два грамма вещества, полученного *Луной-20*, были обменены на один грамм горных пород, доставленных *Apollo 15*. Был проведен также обмен вещества из колонки *Луны-24* с образцами, доставленными другими экспедициями *Apollo*. Некоторые образцы были подарены советскими учеными лабораториям другим стран, в том числе Франции, Австрии и Чехословакии. Среди других результатов заслуживают внимание данные, полученные при помощи высотомеров в ходе спуска посадочных аппаратов, в частности *Луны-15*, которые позволили оценить среднюю плотность лунной поверхности.

Станции Е-8 - Луноходы. Конструкция луноходов была простой и эффективной. *Луноход-2* был усовершенствованной версией *Лунохода-1* и лучше оснащен научными приборами (рис. 10, 11). Каждый луноход представлял собой герметичный корпус из магниевого сплава, напоминающий по форме бадью, накрытую большой навесной крышкой. Внутри нее были размещены система управления, приборы и датчики для контроля

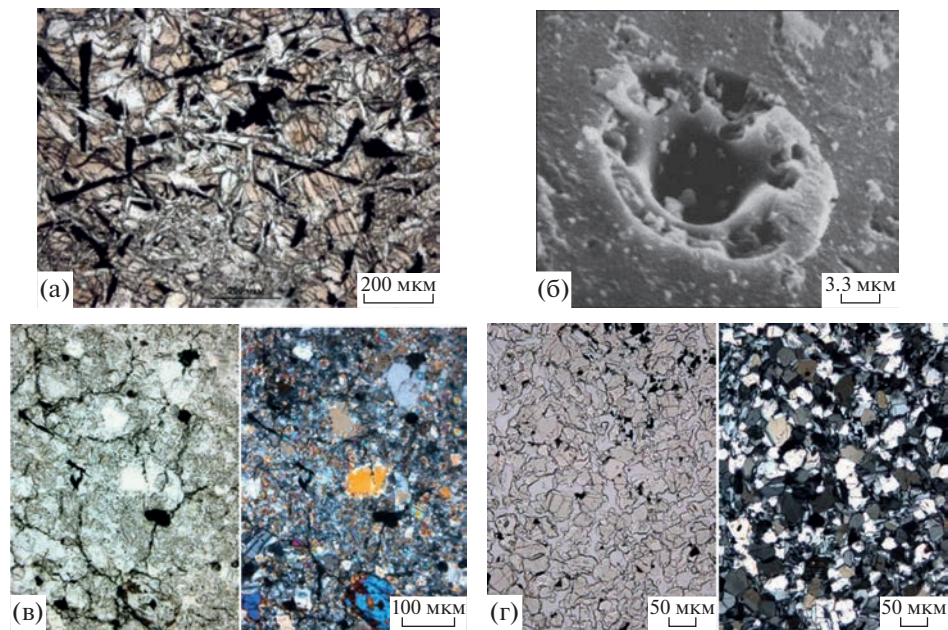


Рис. 9. Примеры структуры и состава лунного грунта, доставленного АМС *Луна-18*, *-20*, *-24*. Изображения, электронная микроскопия: а — фрагмент базальта, *Луна-16*; б — микрократер, *Луна-16*, в — гранулированная брекчия, *Луна-20*, г — фрагменты ферробазальта, *Луна-24*. Источник: ГЕОХИ РАН.

свойств окружающей среды. Масса *Лунохода-1* составляла 756 кг, а *Лунохода-2* — 836 кг, высота 135 см, длина 170 см, ширина в верхней части 215 см, а в нижней у колес 160 см, размер шасси 2.22×1.6 м. В дневное лунное время поворотная крышка открывалась, поднимаясь над задней частью лунохода для зарядки аккумуляторов от солнечных батарей, расположенных на внутренней поверхности крышки и вырабатывавших ~1 кВт мощности. Одновременно обеспечивалась работа системы терморегулирования за счет радиаторов, расположенных в верхней части корпуса. В ночное время лунных суток крышка закрывалась и работоспособность лунохода при окружающей температуре около -150°C поддерживалась за счет небольшого радиоизотопного источника массой 11 кг на основе полония-210 и радиатора наверху закрытой крышки. Корпус монтировался на шасси с восемью колесами диаметром 51 см из провололочной сетки, трущаяся поверхность которых была набрана из титановых лопаток. Каждое колесо оснащалось индивидуальной подвесной системой с использованием особой смазки для работы в вакууме, герметичными двигателями постоянного тока и независимым тормозом [4, 5].

Луноход управлялся с Земли командой из пяти человек, автоматический режим не предусматривался, а рулевое управление допускало независимое изменение скорости колес. Аппарат мог передвигаться, даже если функционировали всего по два колеса с каждой стороны, а каждый мост мог в случае блокировки отсоединяться от колеса.

Наименьший радиус поворота составлял 80 см. Ориентация определялась с помощью внутренних гироскопов. Луноход мог преодолевать препятствия высотой до 40 см и шириной до 60 см, взбираться по откосу до 20 градусов и маневрировать на откосах до 45 градусов. Аппарат оснащался устройствами для предотвращения перемещения по откосам с большим наклоном, гарантирующими устойчивость положения и безопасность. У *Лунохода-1* была всего одна скорость, 800 м/ч, с которой он мог двигаться либо вперед, либо назад, а *Луноход-2* мог двигаться в обоих направле-

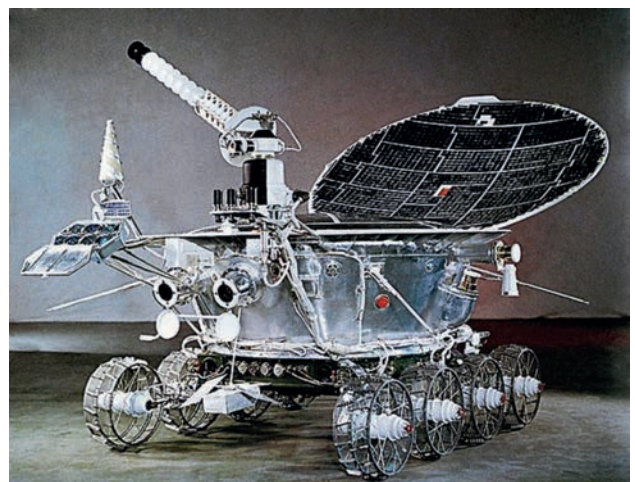


Рис. 10. *Луноход-1* (НПО Лавочкина).

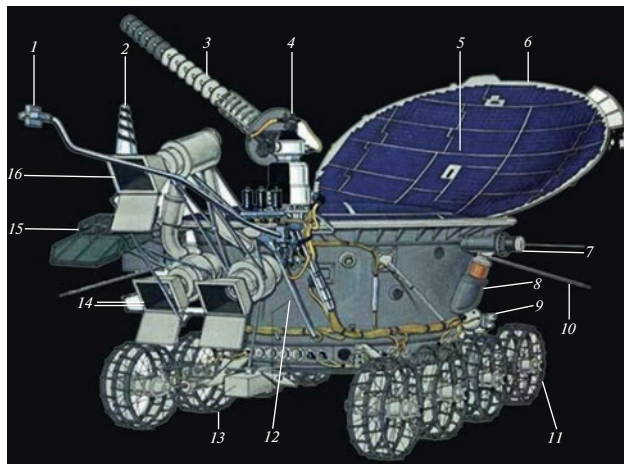


Рис. 11. *Луноход-2* (НПО Лавочкина).

ниях со скоростями 800 или 2000 м/ч. Экипаж управлял самоходным аппаратом с помощью пары телекамер, расположенных в передней части лунохода и снабженных иллюминаторами, которые передавали картинку с низким (250 строк по горизонтали) разрешением со скоростью 20 секунд на кадр у *Лунохода-1* и с гораздо большей скоростью, 3.2 с на кадр у *Лунохода-2*, который был оснащен дополнительной камерой. Обе пары камер совместно создавали 360-градусную панораму. Разрешение каждой 180-градусной панорамы составляло 500×3000 пикселей. На управлении сказывалась примерно пятисекундная задержка при передаче сигнала с Луны на Землю и обратно. По левому и правому борту лунохода были установлены четыре телефотометра, которые обеспечивали полный вертикальный панорам-

ный обзор, включая небо и звезды при наведении в зенит для целей навигации, и индикатор уровня положения лунохода относительно надир. Сзади к луноходу прикреплялось девятое штыревое колесо с одометром-спидометром для измерения скорости и расстояния. На пантографе был смонтирован пенетрометр (прибор ПРОП) для измерений физико-механических свойств лунной поверхности, а ее состав определялся рентгенофлуоресцентным спектрометром Рифма, что обеспечивало полноту данных геолого-геохимического анализа и свойств участков поверхности, видимых на панорамах. На обоих луноходах был установлен французский лазерный уголкового отражатель массой 3.5 кг, состоявший из четырнадцати 10-см силиконовых призм, с помощью которого проводились измерения расстояния от Земли до Луны с точностью до 3 м (*Луноход-1*) и 40 см (*Луноход-2*). Ландшафты лунной поверхности в области работы *Лунохода-1* показаны на рис. 12, а трасса передвижения *Лунохода-2* — на рис. 13.

Станция *Луна-17* с *Луноходом-1* совершила посадку в Море Дождей 17.XI.1970, а *Луна-21* с *Луноходом-2* внутри заполненного лавой кратера Лемонье, в Таврских горах на восточном берегу Моря Ясности 15.I.1973. Аппараты были рассчитаны на работу в течение трех лунных месяцев, однако в реальности первый луноход проработал на Луне почти год, а второй свыше 4-х месяцев. *Луноход-1* преодолел путь длиной 10540 метров и передал более 20000 изображений, 206 панорам, 25 рентгеновских измерений состава и более 500 физико-механических тестов грунта. На десятый лунный день его сфотографировали с орбиты астронавты *Apollo 15*. *Луноход-2* за меньшее время преодолел в четыре раза большее расстояние (37 км), включая

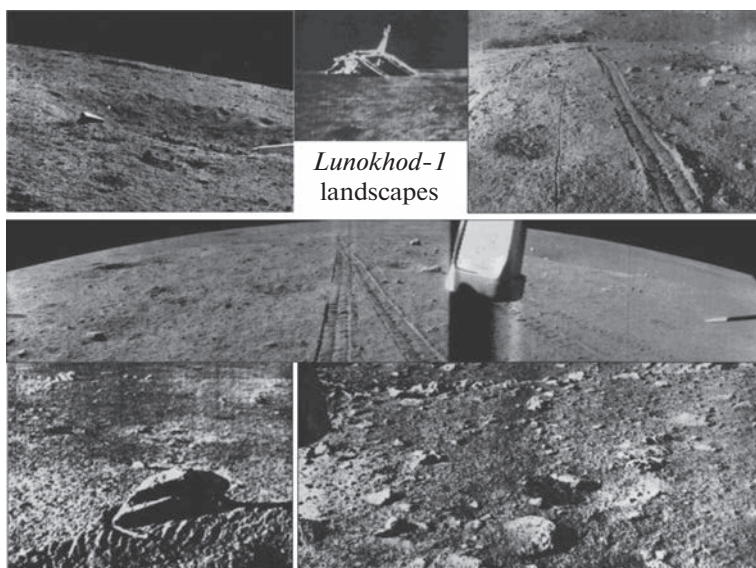


Рис. 12. Следы *Лунохода-1* (Монтаж изображений А.Т. Базилевского).

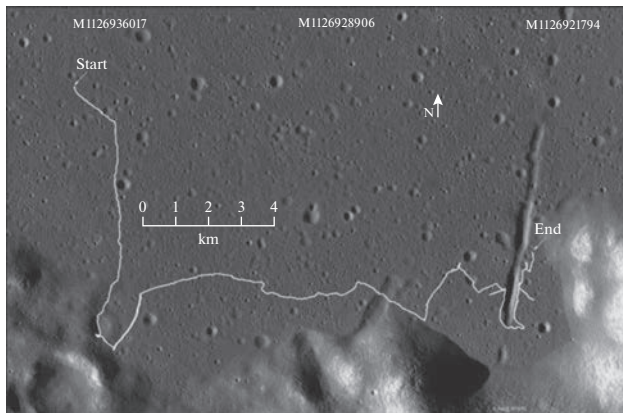


Рис. 13. Трасса *Лунохода-2* на поверхности Луны. Изображение района лунной поверхности — снимок *LRO, NASA*.

холмистые возвышенности и ложбины на поверхности Луны, передав более 80000 изображений и 86 панорам, результаты сотен анализов элементного состава и механических свойств грунта и ряда других экспериментов. Его судьба, однако, оказалась фатальной: 9.V.1973, выбираясь наружу из небольшого, но достаточно глубокого кратера, он задел своей крышкой склон кратера, из-за чего солнечные панели покрылись слоем реголита. Когда же крышка закрылась на лунную ночь, грунт скатился на радиаторы, что нарушило нормальную работу системы терморегулирования. И когда на следующий лунный день крышка открылась, проблемы с тепловым режимом и электропитанием привели к прекращению функционирования аппарата. Места вечной стоянки обо-

их луноходов на поверхности Луны были отсняты с американского спутника *LRO* (см. рис. 14).

Работа луноходов принесла много важных научных результатов. На Землю были переданы десятки тысяч отдельных изображений и сотни панорам, что позволило детально исследовать геологические свойства Луны, в том числе особенности рельефа, структуры и распределения кратеров. Помимо упомянутого геолого-геохимического анализа различного типа ландшафтов и свойств лунных пород, было показано, что Море Дождей и дно кратера Лемонье образованы типичными породами морских базальтов, в то время как возвышенная местность вокруг кратера Лемонье содержит более высокие концентрации железа, кремния, алюминия и калия. При помощи рентгеновского телескопа проводились наблюдения Солнца и Галактики, изучалась интенсивность космического излучения на поверхности Луны. Магнитометр *Лунохода-2* измерил слабое магнитное поле, меняющееся из-за токов, индуцированных межпланетными магнитными полями. Фотометрические измерения привели к несколько неожиданным результатам относительно яркости лунного неба. Оказалось, что в дневное время лунное небо загрязнено заметным количеством пыли, и что при свете Земли в ночное время лунное небо в 15 раз ярче, чем небо на Земле при полной Луне. Этот результат существенно ослабил интерес к перспективам создания астрономической обсерватории на лунной поверхности. Лазерные измерения при помощи уголковых отражателей, проводившиеся на обсерваториях Пик-дю-Миди в Альпах и Симеиз в Крыму, позволили уточнить периодическую и вековую динамику

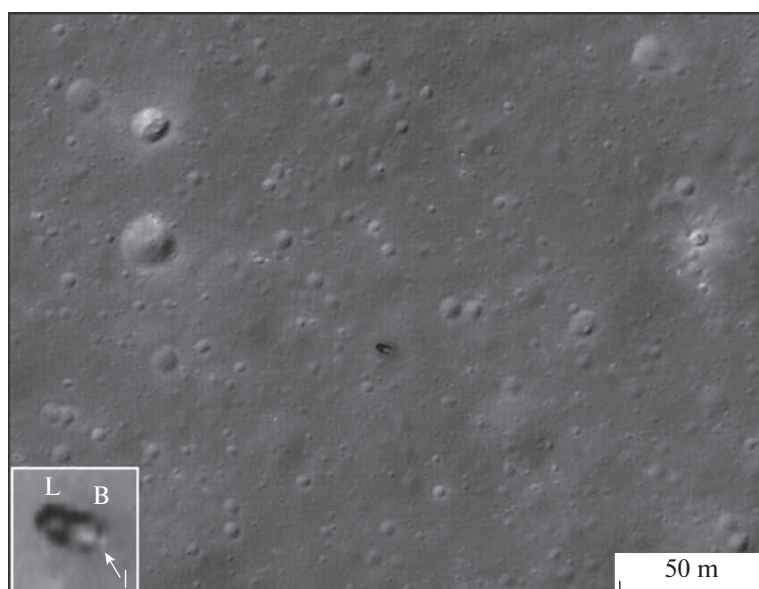


Рис. 14. Место парковки *Лунохода-2* на поверхности Луны. Снимок со спутника *LRO (NASA)*.

движения Луны. Историческое значение имеют следы, оставленные колесами луноходов в виде борозд на поверхности Луны, которые, как и следы астронавтов, в условиях слабой эрозии лунной поверхности, сохраняются миллионы лет.

Последний полет аппарата серии *E-8 Луна-24* был осуществлен в августе 1976 г., почти за четыре года до этого, в декабре 1972 г. совершил полет на Луну последний по программе *Apollo* корабль *Apollo 17*, а в 1973 г. завершил работу *Луноход-2*. С тех пор в исследованиях Луны наступило “затишье”, которое продолжалось почти 20 лет, до 1994 г., когда к Луне был запущен американский автоматический аппарат *Clementine*, хотя его целевой задачей было испытание военных технологий. Вскоре после этого были осуществлены полеты американских лунных аппаратов *Lunar Prospector*, *Smart 1*, *ARTEMIS (Acceleration, Reconnection, Turbulence and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun)*, *LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter)*, *LCROSS (Lunar CRater Observation and Sensing Satellite)*, *GRAIL (Gravity Recovery and Interior Laboratory)*, *LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer)*. Наиболее успешными были миссия *LRO/LCROSS*, включавшая в себя лунный спутник *LRO* массой 1900 кг и выведшую его на окололунную орбиту последнюю ступень ракеты-носителя *LCROSS*, а также система из двух спутников *GRAIL* для изучения связи аномалий гравитационного поля с внутренним строением Луны. Спутник *LRO* с орбиты высотой около 20 км провел комплекс измерений на лунной поверхности и в окружающей космическом пространстве, включая выбор наиболее перспективных в научном и безопасных в инженерном отношении мест посадки для будущих автоматических аппаратов и пилотируемых экспедиций. На спутнике *LRO* был установлен российский прибор *LEND* для измерений методом нейтронного мониторинга водородсодержащих соединений (наиболее вероятным из которых является водяной лед) в лунных породах [7, 8]. Ранее этот метод использовался на лунных спутниках *Clementine* и *Lunar Prospector* [9, 10]. Ступень *LCROSS* была заторможена, сошла с орбиты и столкнулась с поверхностью Луны вблизи Южного полюса, чтобы в момент взрыва высвободить летучие компоненты.

За последние два десятилетия на сцену вышли новые игроки — космические агентства Китая, Индии, Японии. С начала 2000-х гг. были осуществлены полеты японского *Kaguya*, китайских *Chang-E-1*, *-2* и *-3*, индийского *Chandrayaan-1*, нацеленных, главным образом, на изучение морфологии лунного рельефа и гравитационного поля. *Chandrayaan-1* подтвердил также наличие на лунной поверхности водородных соединений (наиболее вероятно в форме воды или гидроксидов — H_2O/OH), обнаруженных ранее *Clementine*, *Lunar Prospector* и *LRO*. Большим успехом китайской

лунной программы стала высадка на поверхность Луны в район Моря Дождей в 2013 г. аппаратом *Chang'e-3* лунохода *Yutu* (Нефритовый заяц), проработавшего, однако, совсем мало, кроме астрономического инструмента *LUT* на посадочной платформе. Но Китай наращивает усилия в изучении и освоении Луны, активно развивая передовые технологии. В январе 2019 г. на обратной стороне Луны в кратере Фон Кармана совершил посадку аппарат *Chang'e-4* с луноходом *Yutu-2*, получившим ряд интересных результатов, включая обнаружение слоистости лунных пород. Наконец, 16.XII.2020 года аппарат *Chang'e-5* совершил забор лунного грунта и доставил на Землю около 1.7 кг пород.

Большую активность в исследованиях Луны проявляют индийские ученые. В июле 2019 г. был запущен аппарат *Chandrayaan-2*, в составе которого был модуль *Vikram* с луноходом *Pragyan*, но на завершающей стадии посадочный модуль разбился. Возрастающий интерес представляют исследования особенностей окололунного пространства, включающие в себя взаимодействие солнечного ветра с экзосферой Луны, электростатические поля и плазменную оболочку, которые одновременно проводятся на лунных спутниках и спутниках Земли — для изучения полей и частиц в системе солнечно-земных связей.

К сожалению, в этой ситуации Россия утратила свои передовые позиции в лунно-планетных исследованиях, которые занимала в предыдущем столетии. Мы почти полвека не летаем к Луне, сроки реализации лунных проектов постоянно сдвигаются.

СОВРЕМЕННЫЕ ЗНАНИЯ О ЛУНЕ

В этом разделе мы кратко коснемся вопросов физических и геолого-геохимических свойств Луны, которые непосредственно связаны с задачами ее настоящих и будущих исследований и проблемами освоения [11].

Морфология и рельеф поверхности. Рельеф поверхности Луны представлен крупными возвышенностями и глубокими котловинами. В отличие от видимой стороны на обратной стороне Луны преобладают возвышенности, горные массивы высотой свыше 6 км. В то же время, вблизи Южного полюса находится обширная впадина — бассейн Эйткен (рис. 15). Эта многослойная структура достигает в поперечнике 2500 км, что составляет почти четверть окружности Луны, и имеет глубину свыше 8 км относительно среднего уровня лунной поверхности (1737.4 км считая от центра), так что с учетом горных районов суммарный перепад высот достигает более 15 км. На возвышенностях расположены огромные ударные кратеры, в том числе самый большой из известных в

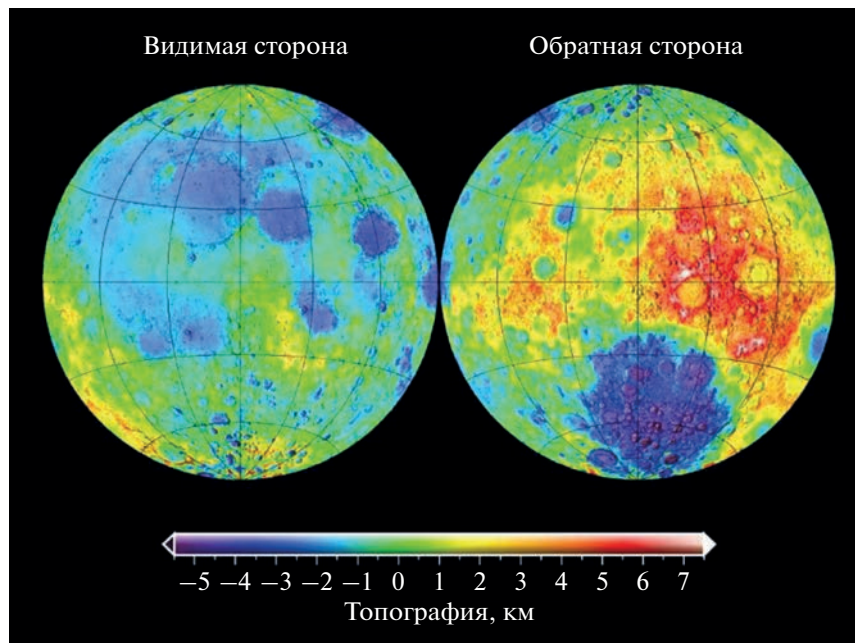


Рис. 15. Рельеф видимой и обратной стороны Луны, показанный в цвете от синего (низкие области и бассейны) до желто-красного (возвышенности и горы) (NASA).

Солнечной системе кратер Герцшпрунг диаметром 591 км и глубиной 4.5 км, находящийся восточнее несколько меньшего по размерам кратера Королев. Он представляет собой многокольцевую структуру, подобную морям на видимой стороне Луны, но не заполненную лавой, поскольку на обратной стороне таких излияний не происходило и там сохранилось гораздо больше крупных ударных структур. Вероятно, они также образовались в результате столкновения с Луной очень крупных астероидов, особенно на рубеже примерно 3.9–4 млрд лет назад в период тяжелой бомбардировки (*LHB*), когда остатки первичных тел — планетезималей и крупные астероиды выпадали на формирувавшиеся планеты. Все это свидетельствует о чрезвычайной неоднородности морфологии поверхности Луны.

Ударное происхождение подавляющего большинства кратеров подкрепляется такими типичными особенностями, как система лучей вокруг многих из них (которые могут быть кратерами вторичного происхождения, сформированными при взрыве), центральная горка, террасы на внутренних откосах валов, и т.д. [12]. Диапазон размеров варьируется от сантиметров до сотен километров, а общее количество кратеров с размером больше, чем 1 км на видимой стороне Луны, превышает 300 тысяч. Кратеры на таком лишенном атмосферы теле, как Луна, подверглись сравнительно небольшой эрозии, вызванной только бомбардировкой метеоритами и прямым взаимодействием с поверхностью солнечного ветра. Из-

за малой скорости эрозии на поверхности сохранились даже очень древние структуры.

Возраст лунных бассейнов и крупных кратеров приблизительно 4 млрд лет, что, как мы видели, совпадает с периодом *LHB* в истории Солнечной системы. В ту эпоху Луна, вероятно, имела расплавленную мантию, находившуюся на глубине 100–400 км и частично изливавшуюся на поверхность [13, 14]. Помимо этого, тонкая кора разбивалась мощными ударами тел астероидных размеров с последующим излиянием лавы, формировавшей лавовые потоки, заполнявшие бассейны. Действительно, основания бассейнов несут следы обширного растекания лунных базальтов, вязкость которых меньше земных, поскольку они содержат больше железа и меньше алюминия и кремния. Скорость их охлаждения и кристаллизации зависела от мощности потоков в условиях непосредственного взаимодействия с космическим вакуумом, что обусловило разнообразие текстур в минералах. Кроме того, бассейны являются областями концентрации масс — *масконов*, которые служат источниками четко выраженных аномалий гравитационного поля, обнаруженных лунными спутниками еще в начале 1960-х гг.

Крупные бассейны часто окружены большими возвышенностями, природа которых, вероятно, связана с этими катастрофическими событиями. Горы в экваториальных и средних широтах достигают высоты от 2 км (Карпаты) до 6 км (Апеннины). Наиболее неровный рельеф, представленный, главным образом континентами, особенно

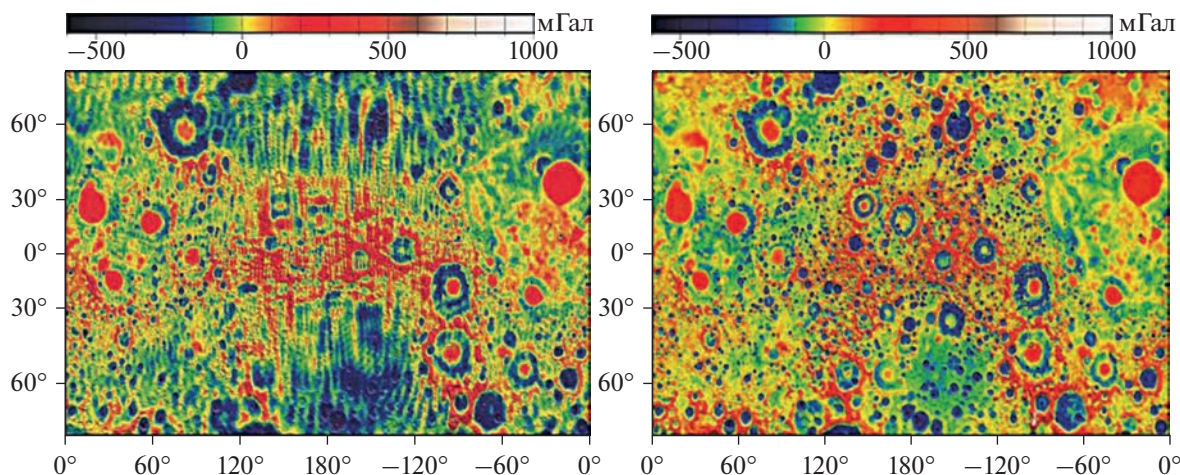


Рис. 16. Гравитационное поле видимой (слева) и обратной (справа) сторон Луны в миллигаллах (10^{-3} см с^{-2}), показанное в цвете от малых (синий) до больших (желто-оранжевый) величин (NASA).

характерен для полярных областей на обратной стороне Луны. Лунная топография на видимой и обратной сторонах Луны в целом хорошо коррелирует с особенностями гравитационного поля и глубинными свойствами.

Фигура и гравитационное поле. Луна обладает сложной фигурой и сильно неоднородным гравитационным полем, что обусловлено особенностями ее происхождения и геологической эволюции [14, 15]. Подобно земной, лунная кора представляет собой верхний слой жесткой литосферы и отличается от подкорковых частей литосферы строением и химическим составом. Но, в отличие от земной коры, поверхность которой создается, главным образом, за счет разнонаправленных воздействий тектонических движений с учетом процессов осадконакопления, сложный характер лунного рельефа и особенности слагающих его горных пород в материковых областях представляют собой реликты начальной стадии формирования из мантийных расплавов [10, 13]. В морских районах кора подверглась значительным модификациям при образовании импактных структур. Ударная бомбардировка, образовавшая на лунной поверхности многочисленные кратеры и огромные котловины, оказала сильное влияние, как на процессы дифференциации недр, так и на ранний вулканизм, характер расплавов, глобальные вариации рельефа, петрологию пород и их механические свойства. С образованием морских бассейнов на видимой стороне Луны за счет выпадения крупных тел размером в десятки и сотни километров было связано возникновение аномалий в структуре гравитационного поля в виде упоминавшихся концентраций масс — масконов, представляющих характерную особенность Луны. Наиболее детальные исследования лунного гравитационного поля и его аномалий были про-

ведены на двух космических аппаратах NASA *GRAIL A (Ebb)* и *GRAIL B (Flow)* на низкой лунной орбите, позволивших получить интересные данные о связи морфологии лунной поверхности с ее глубинными свойствами и особенностями гравитационного поля (рис. 16).

Исследования небесно-механических проблем формирования системы Земля—Луна с геолого-геохимическими природными свойствами Луны дают возможность отыскать важные аналогии в эволюции обоих тел и лучше понять особенности формирования фигуры и гравитационного поля Луны. Фигура Луны непосредственно связана с эволюцией лунной орбиты и наличием угла запаздывания приливного выступа относительно кульминации Земли как приливообразующего тела [14]. На начальном этапе эволюции при близком расположении Луны к Земле ее влияние на фигуру Луны (и, соответственно, диссипацию приливной энергии) было максимальным. Следует подчеркнуть, что с изучением системы Земля—Луна связываются ответы на ряд актуальных вопросов относительно происхождения и эволюции Земли и всей Солнечной системы.

Петрография, состав пород. Поверхность Луны состоит, главным образом, из базальтов — самых распространенных магматических пород на поверхности Земли и других планет Солнечной системы (рис. 17) [16]. В лунных базальтах выделено шесть основных типов пород, содержащих свыше 50 минералов, среди которых главное место принадлежит силикатам и окислам, а к сопутствующим минералам относятся сульфиды, карбиды, фосфаты, фосфиды. Средняя плотность пород от 3.1 до 3.4 г/см³, а главными породообразующими минералами являются широко распространенные на Земле полевые шпаты, плагиоклазы, пироксены, оливины, магнетит. В их состав входят



Рис. 17. Основные породы лунных морей и континентов. (А.Т. Базилевский. ГЕОХИ РАН).

хорошо известные на Земле химические элементы (Si, Al, Fe, Ca, Mg и др.), но в лунных породах больше, чем в земных, содержится тугоплавких элементов (Ti, Zr, Cr и др.) и меньше — легкоплавких (Pb, K, Na и др.). В целом лунная кора обеднена легколетучими и сидерофильными (“железлюбящими”) элементами, включающими семейство Fe и платиновые металлы, и обогащена труднолетучими элементами. Основной служит кремнезём SiO_2 — от 45 до 52–53%, щелочи ($\text{Na}_2 + \text{K}_2$) — от 5 до 7% и различные оксиды (TiO_2 — 1.8–2.3%; Al_2O_3 — 14.5–17.9%; Fe_2O_3 — 2.8–5.1%; FeO — 7.3–8.1%; MnO — 0.1–0.2%; MgO — 7.1–9.3%; CaO — 9.1–10.1%; P_2O_5 — 0.2–0.5%).

Хотя сами лунные породы содержат те же породообразующие минералы, которые широко распространены на Земле, по своему химическому, минералогическому составу и структуре они отличаются от земных [14, 16]. В частности, плагиоклазы, принадлежащие к важной породообразующей группе силикатных минералов в семействе полевых шпатов (Ca – Na полевые шпаты), образуют обедненный железом и обогащенный кальцием анортозит, который является главной составляющей пород лунной коры, слагающих лунные материки. Их возраст достигает 3.6–4.6 млрд лет. По своему минеральному составу (рис. 17) они относятся к интрузивным породам анортозит-норит-троктолит-габбровой серии. Их часто называют *ANT*-породы — по начальным буквам названий анортозит, норит, троктолит. Анортозит состоит почти полностью (на 75%) из плагиоклаза, оливина, пироксена и магнетита. Норит, троктолит и габбро содержат примерно в равных количествах плагиоклаз и ортопироксен (норит), плагиоклаз и клинопироксен (габбро), плагиоклаз и оливин (троктолит). В большинстве своем они являются следствием процессов метамор-

физма, в первую очередь, продуктами ударной переработки и спекания — брекчиями. В составе материков содержатся также крип-базальты (*KREEP*) — особая группа лунных пород с высоким содержанием щелочей, которые аномально обогащены калием (K), редкоземельными элементами (*Rare Earth Elements* — *REE*) и фосфором (P).

Базальты лунных морей отличаются от базальтов материковых районов: у них более высокое содержание оливина и пироксена и ниже содержание плагиоклаза и щелочей, а возраст составляет от 3.1 до 3.9 млрд лет, в то время как у материковых он близок к возрасту Земли (~4.5 млрд лет). Они обогащены железом, особенно оксидом железа на основе Fe^{2+} , и титаном в составе минерала ильменита, содержащего до ~15% Ti^{4+} , по сравнению с ~4% в земных минералах, у них также повышенное содержание оксидов алюминия и кальция и ниже содержание щелочей. В то же время материковые базальты-габбро-норит-анортозитовый комплекс пород, глиноземистые базальты и крип-базальты-характеризуются высоким содержанием щелочей, редкоземельных элементов и фосфора.

Под действием метеоритной бомбардировки, сопровождавшейся дроблением и плавлением пород, образовался особый тип верхнего слоя лунной поверхности (как и поверхности других безатмосферных тел) — реголита [12, 14, 16–20]. Его толщина достигает десятков метров, состав основных пород — оливин, пироксен, анортит, ильменит. В структуре реголита содержатся брекчии — спрессованные и сцементированные расплавы, образующиеся при ударно-взрывном воздействии. Много брекчий присутствует в образцах, доставленных лунными космическими аппаратами. Очень мелкий лунный реголит состоит из кремнеземного стекла и имеет текстуру, подобную снегу.

Таблица 1. Содержание водяного льда на месте соударения с поверхностью Луны верхней ступени ракеты (эксперимент *LCROSS*). Максимальное содержание H_2O $5.6 \pm 2.9\%$ по массе [24]

Соединение	Число молекул на единицу площади, $см^{-2}$	Относительное содержание в % к H_2O
H_2O	$5.1(1.4) \cdot 10^{19}$	100.00
H_2S	$8.5(0.9) \cdot 10^{18}$	16.75
NH_3	$3.1(1.5) \cdot 10^{18}$	6.03
SO_2	$1.6(0.4) \cdot 10^{18}$	3.19
C_2H_4	$1.6(1.0) \cdot 10^{18}$	3.12
CO_2	$1.1(1.0) \cdot 10^{18}$	2.17
CH_3OH	$7.8(42) \cdot 10^{17}$	1.55
CH_4	$3.3(3.0) \cdot 10^{17}$	0.65
OH	$1.7(0.4) \cdot 10^{16}$	0.03

Решающим фактором в эволюции лунного реголита и истории его накопления является послойное изменение в результате выбросов при ударах, что было подтверждено результатами анализа активности космогенных изотопов ^{26}Al и ^{22}Na , образованных космическими лучами на разной глубине [21]. С ударами метеоритов, оказывающих специфическое влияние на морфологию частиц реголита, связано образование металлического железа, ассоциированного с кристаллическими силикатами [22]. Следует подчеркнуть, что железу в восстановленном или окисленном состоянии, как и ряду других элементов, геохимиками уделяется большое внимание, поскольку это связано с аккреционной стадией формирования планетной системы. В частности, наличие в породах Луны и их минералах металлического Fe, также, как и Ti и Cr в трехвалентной форме, свидетельствует о восстановительных условиях при аккреции Луны. Данные о степени окисления железа, кремния, титана, алюминия, магния в лунных породах, в сопоставлении с различными земными породами, можно получить из анализа рентгеновских фотоэлектронных спектров этих элементов, а также кислорода, в различных квантовых состояниях. Результаты этих исследований подтвердили наличие мелкодисперсного металлического железа на поверхности частиц реголита, которое присутствует, наряду с окисленным железом, независимо от объемной концентрации FeO из-за очень низкой активности кислорода при низких температурах и, как следствие, недостаточного стехиометрического отношения. Следует при этом иметь в виду, что часть железа могла восстанавливаться до металлического из FeO силикатов при повышенной температуре.

Дефицитом кислорода на аккреционной стадии объясняется отсутствие в лунных породах Fe_2O_3 и Fe_3O_4 , поскольку для их образования требуется парциальное давление кислорода на порядки большее, чем для образования оксида FeO с двухвалентным железом Fe^{2+} . В морских базальтах его в 2–3 раза больше, чем в материковых, наряду с еще большим (на порядок) содержанием TiO_2 , но значительно меньшим содержанием Al_2O_3 и CaO. К сожалению, мы пока не можем ответить на вопрос о том, “какие процессы вызвали, в одном случае, избыток, а в другом — дефицит определенных химических элементов в лунных поверхностных породах”. Ясно, однако, что эти различия оказали большое влияние на физические свойства магмы и образование различных минералов в морских и материковых районах Луны, необычных для земных базальтов [23].

Как уже говорилось, до недавнего времени Луна считалась “сухим” небесным телом, так как согласно имевшимся данным, лунные породы обеднены водой и летучими компонентами. На самом деле, как показали новые результаты космических исследований водородсодержащих соединений, наиболее вероятным представителем которых может быть водяной лед, его содержание в верхнем поверхностном слое полярных областей Луны довольно высокое — от долей до нескольких процентов [7]. Наиболее полными на сегодняшний день являются данные нейтронного мониторинга российским прибором LEND на спутнике *LRO* (рис. 18) и спектроскопических наблюдений газового облака, выброшенного при падении ступени *LCROSS* (рис. 19, табл. 1 [24]), хотя в количественных оценках есть определенные расхождения. Показано, что область, в которой наблюдается понижение нейтронного потока (и, соответственно, повышенной концентрации водорода), простирается за пределы постоянно затененных областей глубоких кратеров, где сохранение водяного льда наиболее вероятно. Объяснить этот эффект можно, исходя из наличия сухого слоя реголита поверх слоя грунта, обогащенного водяным льдом, что сохраняет его в районах, периодически освещаемых Солнцем [7]. Наибольшая концентрация наблюдается в районе кратеров Кабео и Шумейкер — около 0.5% по массе [8]. Показано, что данные эксперимента *LEND* и оценка концентрации водорода в месте проведения эксперимента *LCROSS* совпадают в пределах статистической погрешности результатов измерений. С площади соударения размером 30–200 m^2 нагретой до температуры выше 950 K, было сублимировано около 300 кг водяного льда. *LCROSS* зарегистрировал 155 ± 12 кг воды, что составило $5.6 \pm 2.9\%$ от массы выброшенного грунта. В облаке взрыва были обнаружены следы других молекул, среди которых, помимо OH, надеж-

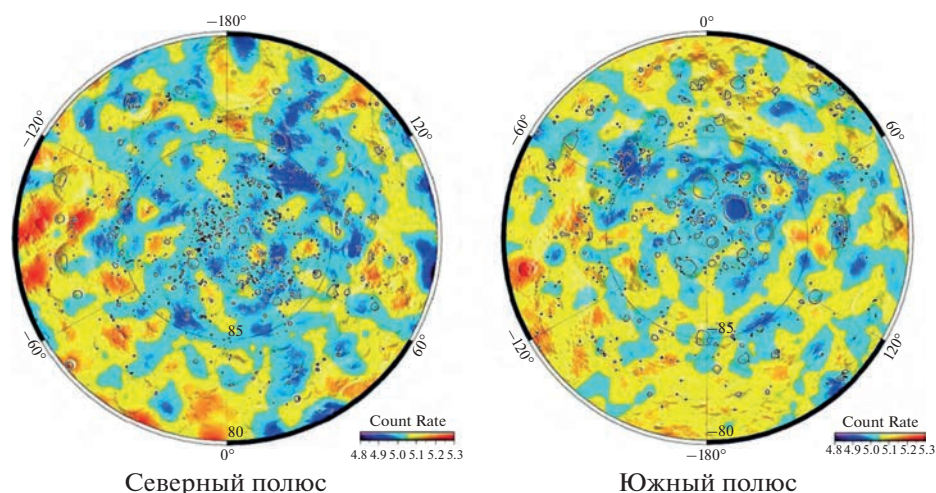


Рис. 18. Распределение водородсодержащих соединений, ассоциируемых с наличием в поверхностном слое Луны водяного льда по данным нейтронного мониторинга прибором ЛЭНД. Цвета соответствуют содержанию от фиолетового (максимальное) к желтому (минимальное) [7].

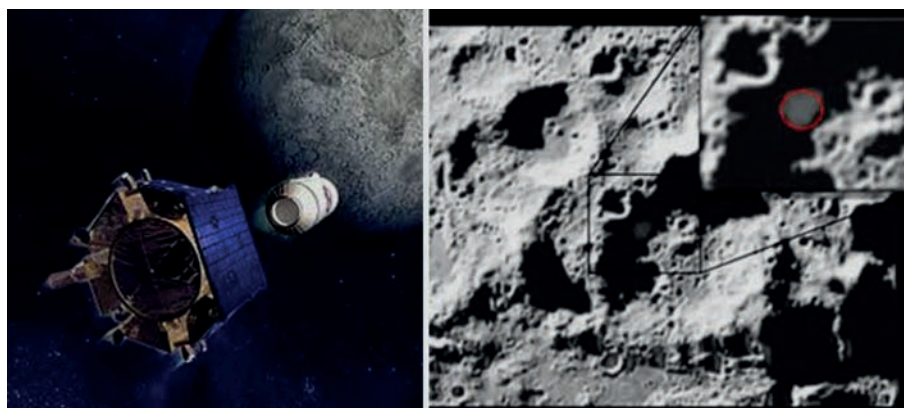


Рис. 19. КА LCROSS и место соударения с поверхностью Луны верхней ступени ракеты (NASA).

но отождествлены H_2S , SO_2 , CO_2 , NH_3 , CH_4 , C_2H_4 и CH_3OH .

Как видим, относительное содержание воды в приповерхностной полярной области Луны оказалось неожиданно большим. Так, в бассейне Южный полюс — Эйткен могут быть сосредоточены большие отложения водяного льда, летучих, а также органических соединений, прежде всего, в постоянно затененных областях глубоких кратеров [25, 26]. Здесь находятся, в частности, постоянно затененные области таких кратеров, как Шеклтон, Кабео и другие, в которых ожидаются значительные отложения водяного льда, и эти запасы воды могут стать основой жизнеобеспечения будущих экспедиций. В свою очередь, расположенная здесь же гора Малаперт представляет пример области постоянного солнечного освещения, что обеспечивает непрерывную генерацию

электроэнергии, и одновременно зону постоянной прямой связи с Землей [14].

Источниками воды, наряду с ограниченной ролью эндогенных процессов, вероятно были экзогенные механизмы — ударная бомбардировка, в первую очередь, кометами и астероидами углесто-хондритового состава, наиболее богатых летучими [27]. Исходя из предположения, что Луна подвергалась интенсивной кометной бомбардировке, легко оценить, что масса доставленной и сохранившейся в полярных областях воды могла бы составить $\sim 3 \cdot 10^8$ тонн. Вода, очевидно, находится в форме льда между частицами реголита, кристаллической воды или даже ледяных прослоек. Другим источником привнесенной воды могли быть протоны солнечного ветра, хотя не исключается и частично сохранившаяся первичная вода из лунных недр. Вследствие ударной бомбар-

дировки в реголите полярных областей могли также накапливаться другие летучие и содержащиеся в кометах органические вещества, в том числе соединения, характерные для межзвездной среды. Изучение таких веществ является одной из важных научных задач будущих исследований Луны, тесно связанных с интригующими проблемами астробиологии.

Внутреннее строение, геохимия. Особенности минералогического состава лунной поверхности неразрывно связаны с ее внутренним строением, геологической историей и формированием лунных ландшафтов [28]. Наши представления о структуре недр тел планетных размеров основываются, естественно, на данных о глубинном строении Земли, полученных путем сейсмондирования. Этот метод внес весомый вклад также в изучение внутреннего строения Луны, а для других планет земной группы он пока недоступен, и существующие представления практически целиком основываются на результатах моделирования [28, 29]. Недостаточно данных и о Луне. Один из вопросов, на который нет однозначного ответа — сохранила ли Луна жидкое ядро и, если да — каков его размер. Другие вопросы — какова природа океанов магмы в бассейнах и образования коры.

Согласно результатам моделирования, основанным на сейсмических данных экспедиций *Apollo*, слой верхней коры простирается примерно до 60 км, а ниже нее, приблизительно на 400 и 600 км, начинается, соответственно, затвердевшая верхняя и средняя мантия. В то же время, по оценкам Виноградова [30] материал коры ассимилировался в общем процессе образования кристаллических пород Луны в тесной связи с ее тепловой историей. Он исходил из того, что содержание ^{235}U в кристаллических породах периферийной лунной коры в 17–20 раз выше, чем в веществе метеоритов и, следовательно, в мантии. В процессе выплавки значительная часть ^{235}U переходит в легкоплавкую фазу, достигающую поверхности Луны. При таком содержании толщина коры не может быть больше 15–20 км, поэтому идет не разогрев недр, а потеря тепла с поверхности. Действительно, тепловой поток оказался выше ожидаемого, на уровне примерно половины от среднего земного, свидетельствуя об отсутствии на Луне современного вулканизма [31].

Кора и мантия формируют мощную литосферу, которая полностью исключает появление трещин и извержение лавовых потоков, хотя вулканическая деятельность была широко распространена на ранней Луне. На глубине около 800 км оканчивается литосфера и начинается лунная астеносфера — расплавленный слой, в котором, как и в любой жидкости, могут распространяться только продольные сейсмические волны. Температура верхней части астеносферы порядка 1200 К.

Между 1100 и 1600 км находится нижняя мантия. На глубине 1380–1570 км происходит резкое изменение скорости продольных волн — здесь проходит граница, хотя и довольно размытая, нижней мантии с ядром Луны. Таким образом, диаметр ядра оценивается величиной приблизительно 300 км [32, 33]. Размер жидкого ядра ограничен также хорошо известным безразмерным моментом инерции — для Луны он $I = 0.392$, что близко к однородному сфероиду с равномерным по радиусу распределением массы, для которого $I = 0.4$. Очень слабое магнитное поле Луны ($\sim 10^{-4}$ от земного) может быть связано с частично затвердевшим ядром и/или медленным вращением Луны.

Абсолютный возраст и датировка геологических событий в лунной истории были определены из изотопных отношений уран-свинец (U-Pb), рубидий-стронций (Rb-Sr) и калий-аргон (K-Ar) в лунных образцах пород. Эти исследования привели к выводу, что Луна сформировалась через 50–70 млн лет после образования Солнечной системы (4567.5 ± 0.5 млн лет), которое, в свою очередь, датировано по возрасту кальций-алюминиевых включений CAI в метеоритах [34, 35]. Луна, по-видимому, испытала внутреннюю дифференциацию с выделением ядра в течение последующих 200 млн лет. Наряду с ударными процессами, она оставила существенные перепады высот на лунной поверхности, особенно в полярных областях на обратной стороне Луны. Энергия ударов и нагрев мантии при распаде радиоактивных изотопов привели к извержениям лавы на поверхность с глубины, превышающей 100 км, и к заполнению лунных морей на видимой стороне, где кора была значительно тоньше. Некоторые особенности лунной морфологии связаны с охлаждением лавы, которое вызвало разломы и появление горных хребтов и долин. Эндогенные процессы прекратились 3.18 млрд лет назад, и в дальнейшем Луна подвергалась только ударной бомбардировке — главным образом, телами, мигрировавшими с периферии Солнечной системы [36]. Процессы дробления поверхностного материала метеоритами, приведшие к образованию реголита, происходили очень медленно, а эрозия была слабой. В результате Луна сохранила уникальную хронику событий на своей поверхности, включая взаимодействие с Солнцем и межпланетной средой, за более чем несколько миллиардов лет.

Луна привлекает особое внимание с точки зрения возможности лучшего понимания геологической истории Земли, потому что на поверхности Луны присутствуют наиболее древние породы, в то время как на Земле они не сохранились в связи с появлением гидросферы, атмосферы, биосферы. Поэтому, образно говоря, Луна — это окно в раннюю геологическую историю Земли. Изучение ее тепловой эволюции открывает возможности лучшего понимания комплекса проблем, свя-

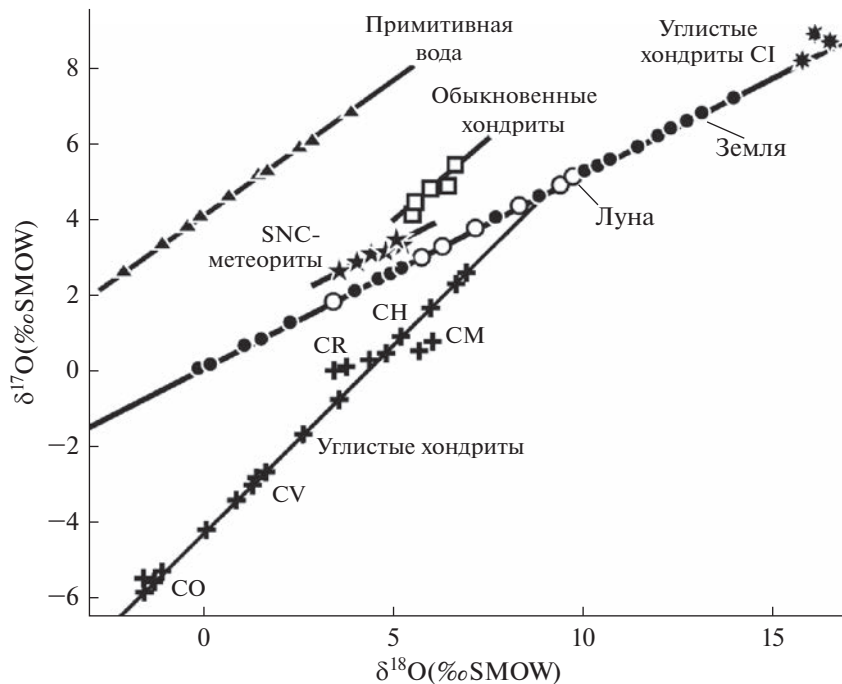


Рис. 20. Диаграмма изотопных отношений кислорода $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ и $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в сопоставлении с обычными и углистыми хондритами и марсианскими метеоритами (SNC) [44].

занных с внутренним строением и формированием оболочек планетных тел [14, 37].

Происхождение и эволюция. Ключевой и до сих пор нерешенной является проблема происхождения Луны. Она имеет давнюю историю (см, напр., [38, 39]). В настоящее время рассматриваются две основные гипотезы: первая, широко распространенная на Западе, известна, как гипотеза мегаимпакта; вторая предполагает формирование Луны и Земли из общего протопланетного облака.

Гипотеза мегаимпакта, предложенная в 1975 г. американскими учеными У. Хартманном и Д. Дэвисом [40] и затем развитая Э. Камероном и У. Уордом [41], исходит из предположения, что Луна возникла в результате катастрофического столкновения с молодой Землей космического тела, по размерам и массе близкого к Марсу (оно получило название Тея по имени древнегреческой богини Земли). Согласно этому сценарию, произошедший скользящий удар колоссальной энергии выбросил из земной мантии вещество, первоначально сконцентрировавшееся на околоземной орбите в виде диска, и из этих фрагментов в процессе их последующего объединения образовалась Луна. В пользу данной гипотезы свидетельствует тот факт, что, Луна по сравнению с Землей содержит очень мало железа, примерно столько же, сколько в силикатной оболочке Земли — мантии, образовавшейся при завершении к этому времени дифференциации вещества недр

Земли и образовании в центре тяжелого железного ядра [42].

В основе другой гипотезы, защищаемой российскими учеными Э.М. Галимовым и А.М. Кривцовым [43–45], лежит сценарий формирования обоих тел из общего протопланетного облака двух газопылевых сгустков с почти одинаковым химическим составом, последующее сжатие которых привело к образованию системы Земля–Луна. В то время как сценарий мегаимпакта подкрепляется малой объемной плотностью Луны, подобной плотности мантии Земли, то вторая идея находится в гораздо лучшем соответствии с важными космохимическими ограничениями, включая идентичность изотопных отношений (изотопных сдвигов) ряда химических элементов для Земли и Луны, среди которых соотношения трех изотопов кислорода $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$ (рис. 20), гафния-вольфрама Hf/W , рубидия-стронция Rb/Sr и др. Учитывая тот факт, что подавляющий вклад (до ~80%) в формирование мишени вносит материал ударника, который должен был составить основу объемной массы Луны, предположение о том, что космическое тело, образовавшееся за пределами орбиты Земли, имело аналогичный ей изотопный состав, представляется достаточно искусственным. Помимо этого, любой высокотемпературный взрывной процесс привел бы к разделению легких и тяжелых изотопов, свойственному кинетическому изотопному фракционированию, чего нет на Луне. Другими словами, эти обстоятель-

ства, по существу, лишают гипотезу мегаимпакта геохимического обоснования. Тем не менее, окончательный вывод пока делать рано, в частности потому, что, как показывают результаты компьютерного моделирования, оба сценария удовлетворяют необходимому ограничению, накладываемому на результирующий угловой момент системы Земля–Луна в процессе ее аккумуляции и на завершающей стадии формирования. Разновидностью данного подхода является модель формирования планет со спутниками на стадии разреженных сгущений при сохранении углового момента при столкновениях таких протопланетезималей [46, 47]. В этом сценарии важную роль на последующей стадии формирования Луны играют тела, выброшенные с ранней Земли и из окрестных областей, выпадающие на растущую Луну (мультиимпактная модель).

Последующие геолого-геохимические процессы включали ряд стадий тепловой эволюции, сопровождавших дифференциацию слагающего вещества на оболочки, о чем говорилось в разделе о лунных недрах. По современным представлениям [14, 48], процессы формирования коры и мантии Луны включали три главных периода, охватывающих интервал от ~4.5 до 3.2 млрд лет, в котором выделяют доимбрийскую, имбрийскую и эратостенианскую геологические эпохи. В эти эпохи формировались, соответственно:

- первичная кора в самой ранней истории, образующаяся из мантийных расплавов, ее последующее расслоение, модификация верхней и средней мантии, диапиры на глубине, сильно кратерированная поверхность;

- вторичная кора, аккумулярованные базальты, частично расплавленная мантия, развитый вулканизм, мантийные плюмы, вулканические горячие пятна, вынос газов из глубины (gasvents) в областях тонкой коры, нерегулярная геологическая структура лунных морей (ring-moat-domeststructures), сопровождающаяся изменением свойств морского дна;

- третичная кора, мантийные расплавы, переплавка глубинного вещества, различные формы вулканизма, метаморфизм поверхностных пород, эрозия/выветривание.

Можно предполагать, что сохранившиеся на Земле древние геологические структуры наиболее близки к третичной лунной коре и процессам, относящимся к эратостенианской эпохе. Наряду с этим Луна испытала, помимо интенсивной ударной бомбардировки, воздействие ряда динамических факторов, связанных с ее образованием, что также оказало воздействие на свойства фигуры и рельефа поверхности. Одной из нерешенных проблем остается, в частности, вопрос о том, с чем связано резкое отличие ландшафтов видимой и обратной сторон Луны.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Луна открывает уникальные возможности для ответа на ряд ключевых вопросов планетной космогонии, среди которых проблемы происхождения системы Земля–Луна и других планет Солнечной системы. Ближайшие планы Роскосмоса предусматривают запуски трех автоматических аппаратов с насыщенной научной программой, призванной дать подход к решению этих проблем.

В ГЕОХИ РАН на протяжении многих лет ведутся работы по изучению важнейших научных и прикладных направлений исследований Луны на ближайшие десятилетия, основанные на существующих знаниях и новых подходах, которые призваны ответить на ключевые вопросы относительно ее природы [14, 49, 50]. Эти разработки напрямую связаны с будущими планами освоения Луны и использования лунных ресурсов. Одновременно проводятся работы по выбору районов посадки на Луну в условиях сложного рельефа южных приполярных областей, представляющих на современном этапе наибольший научный и прикладной интерес и отвечающих требованиям по безопасности [50–54]. Среди них особенно привлекательным выглядит гора Малаперт в регионе хребта Шаклтон на 86° ю.ш. на дне крупнейшего в солнечной системе ударного кратера Южный полюс – Эйткен, который, помимо перспективных залежей водяного льда, отвечает требованиям по максимальной солнечной освещенности и непрерывной радиовидимости Земли.

Многообещающую перспективу “возвращения России на Луну” открывает запуск первого из новой серии лунных аппаратов, включенных в ФКП, *Луна-25 (Луна Глоб)*. Название *Глоб* сохранилось чисто исторически: так был назван проект многоцелевого космического аппарата, предложенного ГЕОХИ РАН еще в конце 1990-х гг. и включавшего, помимо орбитального и посадочного аппаратов, использование пенетраторов.

Запуск *Луны-25* в нынешней конфигурации нацелен на решение, главным образом, технических задач мягкой посадки на Луну, а основная научная программа будет осуществляться на *Луне-27 (Луна Ресурс)*. Научные задачи этих миссий разработаны Институтом космических исследований РАН. Главной научной задачей *Луны-25* является исследование физико-химических свойств и структуры реголита вблизи Южного полюса Луны, где по данным эксперимента *LEND* на орбитальном аппарате *LRO* и данных *LCROSS* содержится водяной лед [7, 8, 24]. На борту установлен комплекс телекамер СТС для съемки поверхности во время посадки и съемки панорам. Предусмотрены исследования содержания водяного льда, состава летучих и их распределения в верхнем поверхностном слое реголита, соотношения фаз, наличия органических соединений. С помощью

прибора АДРОН методом нейтронной каротажа намечается изучение состава основных породообразующих элементов и получение оценки массовой доли воды. Аппарат снабжен манипулятором для взятия с поверхности образцов пород с глубины до 20–30 см, масс-спектральный анализ которых будет проводиться прибором ЛАЗМА с одновременной стереосъемкой рабочего поля. На манипуляторе установлен также ИК-спектрометр ЛИС, который может наводиться на различные участки поверхности вблизи аппарата, включая раскопанные манипулятором, что позволит получить независимую оценку содержания воды в лунном грунте. Намечены исследования примыкающей к лунной поверхности разреженной газовой оболочки – экзосферы. Прибором АРИЕС будут измеряться потоки плазменной и нейтральной компонент, а детектором ПмЛ изучаться содержание в экзосфере пылевых частиц.

Запуск *Луны-26* предназначен для детального изучения с окололунной орбиты лунной поверхности – минералогического состава, структуры и состава подповерхностных слоев, включая содержание водяного льда. При помощи гамма-нейтронного спектрометра ЛГНС будет проводиться глобальная ядерно-физическая геологоразведка лунного реголита. Предусмотрены исследования свойств лунной экзосферы и солнечного ветра в окрестности Луны – окололунной плазмы, плотности метеорного вещества, процессов взаимодействия плазмы с поверхностью.

Научной программой *Луны-27* предусмотрены детальные исследования приполярной зоны Южного полюса, которая в перспективе может стать районом Российского лунного полигона. Должна быть обеспечена посадка с точностью около 1 км, а состав экспериментов по сравнению с *Луной-25* значительно расширен. Аппарат оборудован бурильной установкой, разрабатываемой российскими специалистами, и комплексом аналитической аппаратуры для изучения состава и свойств реголита и экзосферы. В состав научной аппаратуры входят приборы ТЕРМО и РАД для изучения теплофизических свойств полярного реголита и измерения теплового потока по глубине залегания. Предусмотрены эксперименты по спектрометрии поверхности в ИК- и оптическом диапазонах длин волн. На аппарате установлен радиомаяк с целью проведения астрометрических измерений и обеспечения пеленгации при создании опорной сети с использованием будущих посадочных аппаратов.

Последующие этапы лунной программы пока находятся в процессе обсуждения. Был предложен проект аппарата *Луна-28* для забора образцов лунного реголита с глубины до 2 метров из полярного района Луны с использованием криогенной техники с сохранением исходного состояния ве-

щества. Предполагалась высокоточная посадка в окрестности *Луны-27*. Одновременно программой *Луны-28* предусматривалась доставка на лунную поверхность малого исследовательского лунохода *МИЛ* и малого автономного исследовательского модуля *МАИМ*, которые должны были продолжить работу после старта возвратной ракеты. В задачи лунохода *МИЛ* входило проведение исследований реголита в окрестности места посадки, а в задачи *МАИМ* – непрерывный мониторинг физических параметров реголита, солнечной радиации и свойств экзосферы у поверхности Луны. Программа включала также проведение эксперимента по аддитивной печати деталей из лунного реголита с их возвращением на Землю для детального изучения свойств.

Помимо этого, специалистами ГЕОХИ РАН предложена программа широкого использования на подготовительном этапе создания лунной базы автоматов-роботов с целью создания глобальной опорной геолого-геофизической сети на лунной поверхности с применением мобильных средств, снабженных буровыми установками [54]. Подобные средства (луноходы нового класса), помимо эффективного решения актуальных научных задач, востребованы для предварительного выбора наиболее подходящих мест для строительства лунной базы с перспективой ее дальнейшего расширения, в качестве начального элемента комплексной инфраструктуры. Предусматривается создание луноходов двух типов: поисково-разведочный луноход среднего класса *Геолог-разведчик* и тяжелый луноход *Робот-геолог* (рис. 21). Они обеспечат региональную геолого-геохимическую и геофизическую съемку в полярных областях Луны, сбор, анализ и сопоставление данных о природных условиях выбранных районов на маршрутах с радиусом до 500 км, получение информации о наличии и доступности таких важнейших местных ресурсов, как водяной лед и замороженные летучие, рудные месторождения, условия освещенности, коммуникации с Землей и др., что предопределяет успешную реализацию проекта создания лунной базы. Месту ее развертывания, как уже говорилось, должен предшествовать детальный геохимический анализ образцов пород (включая керны с глубины до 6–8 м) производимый на борту лунохода, снабженного комплексом аналитических инструментов (см. [48]). Часть образцов могла бы доставляться на Землю возвратной ракетой для детальных лабораторных исследований.

Такой подход служит альтернативой региональным геологическим экспедициям с участием людей на расстояниях в десятки километров, на которые делается упор в американской лунной программе. Между тем, с учетом суровых условий на поверхности Луны, пребывание космонавтов и членов будущих экспедиций скорее должно быть

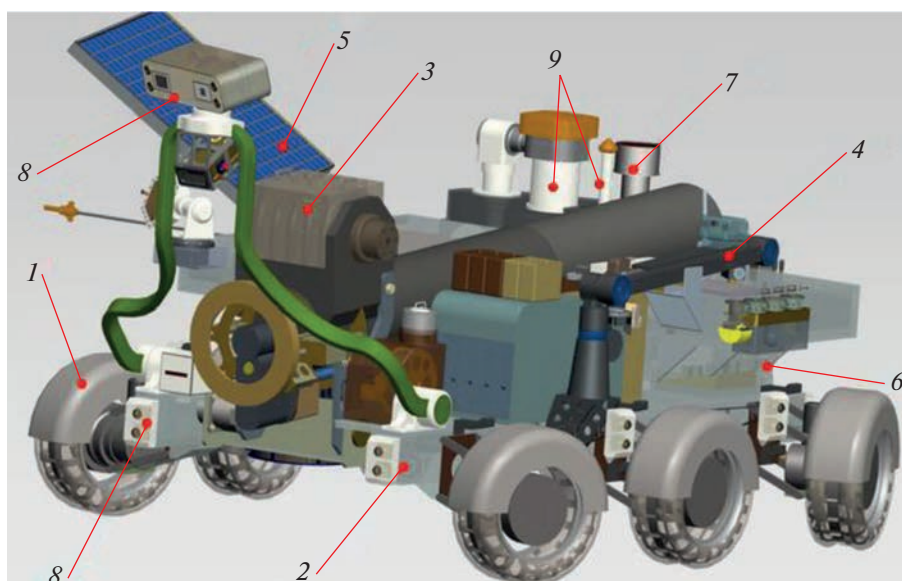


Рис. 21. Проект лунохода *Робот-геолог*. 1 — система движения; 2 — основание; 3 — бурильная установка; 4 — манипулятор; 5 — система энергоснабжения; 6 — система терморегулирования; 7 — навигационный комплекс; 8 — система технического зрения; 9 — системы управления и связи. (ГЕОХИ РАН).

ограничено относительно небольшими участками, а их роль сводится к проведению завершающих работ, осуществляемых робототехническими средствами, и отладке оборудования в условиях, защищенных от внешних факторов. Такой наиболее рациональный подход призван обеспечить максимально возможную безопасность, играющую первостепенную роль при реализации стратегии освоения человеком Луны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Луна представляет первостепенный интерес для планетной космогонии, планетологии и наук о Земле — геофизики, геологии, геохимии. Ключевое значение имеет сравнительное изучение Земли и Луны, формирования их геолого-геохимических особенностей, сходства и различия основных этапов эволюции в контексте комплексного изучения Солнечной системы. Между тем, несмотря на значительный прогресс в знаниях о населяющих ее телах — планетах и спутниках, кометах, астероидах, ответы на многие ключевые вопросы о происхождении и эволюции Солнечной системы, пока не найдены. К ним относятся, в частности, проблемы происхождения и внутреннего строения Луны, дальнейшее детальное изучение которой имеет важнейшее значение для реконструкции основных эволюционных процессов всего семейства тел Солнечной системы. Это одновременно позволит лучше понять раннюю историю Земли и причины различных путей эволюции Земли и планет земной группы.

Советский Союз положил начало полетам лунных космических аппаратов и внес основополагающий вклад в ее изучение. Были получены первые в мире фотографии обратной стороны Луны, осуществлена первая мягкая посадка на Луну, запущен первый искусственный спутник Луны, созданы аппараты для автоматического забора и доставки на Землю лунного грунта и самоходные аппараты — луноходы. Была отработана система возвращения на Землю после облета Луны аппарата со второй космической скоростью, получены уникальные снимки лунной поверхности и ряд важных научных результатов. К сожалению, разрушительные социально-экономические процессы в стране, сопровождавшие перестройку, оказали пагубное влияние на космическую сферу деятельности, особенно на научные исследования, отбросившие нас на десятилетия назад. Возрождение началось лишь с наступлением нынешнего столетия, но процесс этот крайне медленный. Только в самое последнее время открылись возможности вернуться к исследованиям Луны в рамках национальной программы.

Луну естественно рассматривать в качестве форпоста на пути освоения человечеством космического пространства. К этому убеждению постепенно приходят даже бывшие сторонники выбора пилотируемой экспедиции на Марс в качестве главной задачи ближайших десятилетий. Освоение Луны, как стратегического плацдарма, создание элементов ее будущей инфраструктуры и начало использования местных ресурсов — все это сегодня в повестке дня ведущих космических

держав. Наибольшее внимание привлекают лунные полярные области, где обнаружены отложения водяного льда и замороженных летучих, что облегчает получение воздуха, воды, а в перспективе — даже ракетного топлива на основе H_2 и O_2 при освоении Луны. Содержащиеся в лунных породах железо, алюминий, кремний, титан и другие элементы и их соединения могут широко использоваться на месте при производстве строительных материалов на основе прогрессивных технологий и больших энергозатрат. Этому этапу должна предшествовать детальная геолого-геохимическая разведка с широким использованием мобильных робототехнических средств с целью выявления потенциально наиболее перспективных мест для создания обитаемой базы на поверхности Луны, включая запасы лунных ресурсов и перспективы использования наиболее эффективных методов их добычи и переработки. Первостепенную роль играют вопросы безопасности при освоении Луны, в первую очередь, радиационной и пылевой обстановки, для чего необходим длительный автоматический мониторинг природных условий в местах будущих поселений и выбор средств защиты.

На современном этапе исследований наибольшее внимание уделяется полярным областям, как потенциально наиболее востребованным с точки зрения использования местных природных ресурсов при освоении Луны. Обширные планы лунных исследований у американского, европейского, китайского космических агентств, все больший интерес к ним проявляют Индия, Япония и Южная Корея. США намечают возобновить пилотируемые полеты на Луну уже в этом десятилетии и сделать их регулярными с целевой задачей начала создания Лунной базы с присутствием на лунной поверхности 2–4 астронавтов. Эта задача обосновывается научно-образовательными, инновационными и экономическими соображениями, но надо думать, что в основе лежат стратегические цели. Южный полюс также является целью российских миссий *Луна-25* и *Луна-27*, которые открывают многоцелевую программу с эффективным использованием нового поколения робототехнических средств. Эта программа должна предшествовать российским планам пилотируемых полетов на Луну.

110 лет назад, в 1911 г., началось исследование Южного полюса Земли, а полстолетия спустя Антарктида стала местом пребывания для нескольких тысяч людей из почти 30 стран, постоянно ведущих там широкомасштабные научные исследования. В современную эпоху аналогом этого процесса может стать начало освоения Южного полюса Луны. Можно думать, что создание лунных баз, как первого этапа на этом пути, начнется уже к середине 21-го столетия. Оно станет новой вехой в развитии человеческой цивилизации и

достойно ознаменует столетнюю годовщину запуска первого искусственного спутника Земли.

Автору довелось участвовать на протяжении многих лет в космических исследованиях Луны и планет вместе с многочисленными коллегами из НПО Лавочкина, Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. Мой долг выразить всем им — и ушедшим из жизни, и ныне живущим — глубочайшую признательность за тесное дружеское сотрудничество.

Данная работа выполнена в соответствии с плановыми исследованиями по госзаданию ГЕОХИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Келдыш М.В., Маров М.Я.* Космические исследования. М.: Наука, 1981. 192 с.
2. *Семенов Ю.П. (Ред.).* Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С.П. Королева (1946–1996). М.: РКК Энергия, 1996. 671 с.
3. *Черток Б.Е.* Ракеты и люди. Т. 3. М.: Машиностроение, 1997. 398 с.
4. *Маров М.Я., Хантрес У.Т.* Советские роботы в Солнечной системе. Технологии и открытия. Изд. 2-е. М.: Физматлит, 2018. 612 с.
5. *Полищук Г.М., Пичхадзе К.М. (Ред.)* Автоматические космические аппараты для фундаментальных научных и прикладных исследований. М.: МАИ-Принт, 2010. 660 с.
6. *Ахманова М.В., Дементьев Б.В., Марков М.Н.* Вода в реголите моря Кризисов (*Луна-24*)? // *Геохимия*. 1978. № 2. С. 285–288.
7. *Mitrofanov I.G., Sanin A.B., Boynton W.V. et al.* Hydrogen Mapping of the Lunar South Pole Using the *LRO* Neutron Detector Experiment *LEND* // *Science*. 2010. V. 330. № 6003. P. 483–486.
8. *Sanin A.B., Mitrofanov I.G., Litvak M.L. et al.* Hydrogen distribution in the lunar polar regions // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 20–30.
9. *Feldman W.C., Maurice S., Binder A.B. et al.* Fluxes of fast and epithermal neutrons from Lunar Prospector: Evidence for water ice at the lunar poles // *Science*. 1998. V. 281. P. 1496–1500.
10. *Jolliff B.L., Gillis J.J., Haskin L.A. et al.* Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105 (E2). P. 4197–4216.
11. *Маров М.Я.* Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной. 2-е изд., исп. и доп. М.: Физматлит, 2018. 544 с.
12. *Melosh H.J.* Impact cratering: A geologic process. Oxford, N.-Y.: Oxford University Press, 1989. 262 p.
13. *Head J.W. III, Wilson L.* Generation, ascent and eruption of magma on the Moon: New insights into source depths, magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 2: Predicted emplacement processes and observations) // *Icarus*. 2017. V. 283. P. 176–223.

14. Маров М.Я., Воронаев С.А., Инатов С.И. и др. Формирование Луны и ранняя эволюция Земли. М.: Ленард, 2019. 320 с.
15. Bussed D.B.J., Spudis P.D., Robinson M.S. Illumination conditions at the lunar south pole // *Geophys. Res. Lett.* 1999. V. 9. P. 1187–1190.
16. Виноградов А.П. (отв. ред.). Космохимия Луны и планет. М.: Наука, 1975. 764 с.
17. Тарасов Л.С., Назаров М.А., Шевалеевский И.Д. и др. Типы пород и химия минералов лунного грунта из Моря Кризисов // *Геохимия*. 1977. № 10. С. 1488–1509.
18. Назаров М.А., Тарасов Л.С., Шевалеевский И.Д. Минералогия материкового реголита (“Луна-20”) // *Грунт из материкового района Луны*. М.: Наука, 1979. С. 226–266.
19. Shkuratov Yu.G., Bondarenko N.V. Regolith layer thickness mapping of the Moon by radar and optical data // *Icarus*. 2001. V. 149. P. 329–338.
20. Head J.W. III, Wilson, L. Rethinking lunar mare basalt regolith formation: New concepts of lava flow protolith and evolution of regolith thickness and internal structure // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. № 20. Article id. e88334.
<https://doi.org/10.1029/2020GL088334>
21. Виноградов А.П., Лаврухина А.К., Горин В.Д., Устинова Г.К. Космогенные ^{26}Al и ^{22}Na в лунном реголите, доставленном “Луной 16” // *ДАН СССР*. 1972. Т. 202. № 2. С. 437–440.
22. Виноградов А.П. О генезисе реголита Луны // *Лунный грунт из Моря Изобилия*. М.: Наука, 1974. С. 348–355.
23. Виноградов А.П. Дифференциация вещества Луны и планет на оболочки // *Космохимия Луны и планет* / Ред. А.П. Виноградов. М.: Наука, 1975. С. 5–28.
24. Colaprete A., Schultz P., Heldmann J. et al. Detection of water in the LCROSS ejecta plume // *Science*. 2010. Vol. 330(6003). P. 463–468.
25. Zhang J.A., Paige D.A. Cold-trapped organic compounds at the poles of the Moon and Mercury: Implications for origins // *Geoph. Res. Lett.* 2009. V. 36. L16203. 5 pp.
26. Zuber M.T., Head J.W. III, Smith D.E. et al. Constraints on the volatile distribution within Shackleton crater at the lunar south pole // *Nature*. 2012. V. 486. P. 378–382.
27. Маров М.Я., Инатов С.И. Доставка воды и летучих к планетам земной группы и к Луне // *Астрономический вестник*. 2018. Т. 52, № 5. С. 402–410 (Маров М.Я., Ипатов С.И. Delivery of water and volatiles to the terrestrial planets and the Moon // *Solar System Research*. 2018. V. 52. № 5. P. 392–400).
28. Жарков В.Н., Паньков В.Л., Калачников А.А., Оснач А.И. Введение в физику Луны. М.: Наука, 1969. 312 с.
29. Хаббард Я.Дж., Родс Д.М. Химическая модель формирования лунных неморских пород (перевод Ионова Д.А.) // *Космохимия Луны и планет.* / Ред. А.П. Виноградов. М.: Наука, 1975. С. 425–438.
30. Виноградов А.П. Кратко о Луне // *Вестник МГУ. Серия геол.* 1973. № 6. С. 3–9.
31. Маров М.Я., Слюта Е.Н. Тепловой поток и теплофизические свойства реголита // *Солнечная система* / Ред. Г.Г. Райкунов. М.: Физматлит, 2014. С. 63–65.
32. Кусков О.Л., Кронрод В.А. Геохимические ограничения на модель строения и тепловой режим Луны согласно сейсмическим данным // *Физика Земли*. 2009. № 9. С. 25–40.
33. Kuskov O.L., Kronrod E.V., Kronrod V.A. Thermochemical constraints on the lunar bulk composition and the structure of a three-layer mantle // *Phys. Earth Planet. Interiors*. 2019. V. 286. P. 1–12.
34. Галимов Э.М. Анализ изотопных систем (Hf-W, Rb-Sr, I-Pu-Xe, U-Pb) применительно к проблеме формирования планет на примере системы Земля – Луна // *Проблемы зарождения и эволюции биосферы* / Ред. Э.М. Галимов. М.: Красанд, 2013. С. 47–59.
35. Иванова М.А. Са, Al-включения из углистых хондритов – самые древние образования Солнечной системы // *Геохимия*. 2016. № 5. С. 409–426.
36. Маров М.Я., Инатов С.И. Процессы миграции в Солнечной системе и их роль в эволюции Земли и планет // *УФН*. 2022 (в печати).
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.08.039044>
37. Toksoz M.N., Solomon S.C. Thermal history and evolution of the moon // *The Moon*. 1973. V. 7. P. 251–278.
38. Urey H.C., MacDonald G.J.F. The origin and history of the Moon // *Physics and Astronomy of the Moon* / Ed. Z. Kopal. London: Academic Press, 1971. P. 230–316.
39. Рускол Е.Л. Происхождение Луны. М.: Наука, 1975. 188 с.
40. Hartmann W.K., Davis D.R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin // *Icarus*. 1975. V. 24. P. 504–515.
41. Cameron A.G.W., Ward W.R. The origin of the Moon // *Lunar and Planetary Science Conference*. 1976. V. 7. P. 120–122.
42. Canup R.M. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact // *Science*. 2012. V. 338. P. 1052–1055.
43. Галимов Э.М. Проблемы образования Луны // *Основные направления геохимии*. М.: Наука, 1995. С. 8–45.
44. Галимов Э.М. Образование Луны и Земли из общего супрапланетного газопылевого сгущения // *Геохимия*. 2011. № 6. С. 563–580.
45. Galimov E.M., Krivtsov A.M. Theories of the Origin of the Moon. New concept: Geochemistry and Dynamics. De Gruyter, 2012. 168 p.
46. Ipatov S.I. The angular momentum of two collided rarefied preplanetesimals and the formation of binaries // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2010. V. 403. P. 405–414.
47. Инатов С.И. Формирование небесных тел со спутниками на стадии разреженных сгущений // *Механика, управление и информатика*. 2015. Т. 7. № 3 (56). С. 386–399.
48. Wiczorek M.A., Neumann G.A., Nimmo F. et al. The crust of the Moon as seen by GRAIL // *Science*. 2013. V. 339(6120). P. 671–675.

49. *Базилевский А.Т., Абдрахимов А.М., Дорофеева В.А.* Вода и другие летучие на Луне (обзор) // *Астрономический вестник*. 2012. Т. 46. № 2. С. 99–118.
50. *Маров М.Я., Слюта Е.Н.* Лунный реголит. Вода. Особенности опробирования замороженных летучих // *Солнечная система* / Ред. Г.Г. Райкунов. М.: Физматлит, 2014. С. 80–86.
51. *Pieters C.M., Head J.W. III, Gaddis L. et al.* Rock types of South Pole-Aitken basin and extent of basaltic volcanism // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106(E11). P. 28001–28022.
52. *Иванов М.А., Маров М.Я., Базилевский А.Т., Костицын Ю.А.* Кратер Богуславский на Луне: выбор места посадки для спускаемого аппарата экспедиции Луна-Глоб // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2017. № 2 (36). С. 44–51.
53. *Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Ivanov M.A. et al.* Potential lunar base on Mons Malapert: Topographic, geologic and trafficability considerations // *Solar System Research*. 2019. V. 53. P. 383–398.
54. *Marov M.Ya., Slyuta E.N.* Early Steps towards the Lunar Base Deployment: Some Prospects // *Acta Astronautica*. 2021. V. 181. P. 28–39.

УДК 523.4-854524.1-52:524.6

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДОЗИМЕТРА “ТРИТЕЛЬ” В СОСТАВЕ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА “МАТРЕШКА-Р” НА БОРТУ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

© 2023 г. А. Э. Лишневский¹, *, В. А. Шуршаков¹, Д. А. Карташов¹

¹Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия

*ael@imbp.ru

Поступила в редакцию 16.11.2022 г.

После доработки 18.01.2023 г.

Принята к публикации 20.01.2023 г.

Представлены предварительные результаты обработки данных дозиметрической аппаратуры “ТРИТЕЛЬ”, состоящей из одного интерфейсного блока и трех блоков взаимно ортогональных телескопов кремниевых детекторов, работающих в режиме совпадений (с возможностью получения данных также и от одиночного режима функционирования).

Дозиметр “ТРИТЕЛЬ” предназначался для изучения временной динамики дозовых нагрузок и анизотропии потоков заряженных частиц в различных точках Служебного модуля (СМ) российского сегмента *Международной космической станции* (РС МКС) с дополнительной возможностью измерений в других модулях РС МКС. В составе космического эксперимента (КЭ) “Матрешка-Р” на РС МКС дозиметр “ТРИТЕЛЬ” эксплуатировался с середины октября 2017 г. до середины октября 2020 г.

В статье представлено описание методики обработки дозиметрических данных аппаратуры “ТРИТЕЛЬ” и предварительные результаты обработки данных, полученных в период с июня по октябрь 2020 г.

DOI: 10.31857/S0023420623220016, EDN: HZAOQI

ВВЕДЕНИЕ

Эксперимент с дозиметрической аппаратурой “ТРИТЕЛЬ” был посвящен изучению космической радиации, влияние которой на бортовую аппаратуру и человека, на данном этапе развития космонавтики, является неустраняемым фактором, существенно ограничивающим возможности изучения и использования человечеством космического пространства. К настоящему времени обычными являются экспедиции на околоземные орбитальные станции длительностью от полугода и более. Важным фактором при планировании таких длительных космических полетов является воздействие радиации на членов экипажа [1–3], причем доза радиации, получаемая космонавтом в космическом полете, обусловлена одновременным воздействием различных источников радиации. Так, дозы радиации на борту МКС могут быть обусловлены тремя источниками [2, 4, 5]: галактическими космическими лучами (ГКЛ), радиационными поясами Земли (РПЗ), и солнечными протонными событиями (СПС).

Но помимо того, что дозовое поле на борту МКС формируется различными источниками радиации, источники этой радиации еще имеют динамическую природу и/или ярко выраженную анизотропию. Для изучения как временной динамики, так и анизотропии потоков космической радиации при помощи системы дозиметров, выполненных в виде телескопов полупроводниковых детекторов, была разработана научная аппаратура “ТРИТЕЛЬ”, входившая в состав космического эксперимента (КЭ) “Матрешка-Р”. КЭ “Матрешка-Р”, в свою очередь, является комплексным, многоэтапным космическим экспериментом, предназначенным для изучения динамики радиационной обстановки на трассе полета и в отсеках МКС, в котором принимают участие как российские, так и зарубежные научные группы. Дозиметрическая аппаратура “ТРИТЕЛЬ” разработана в рамках сотрудничества между Центром энергетических исследований Венгерской академии наук (МТА ЕК) и Государственным научным центром Российской Федерации – Институтом медико-биологических проблем Российской акаде-

мии наук (ГНЦ РФ – ИМБП РАН). Дозиметр “ТРИТЕЛЬ” предназначался для изучения динамики дозовых нагрузок и анизотропии потоков заряженных частиц в различных точках Служебного модуля (СМ) российского сегмента *Международной космической станции* (РС МКС) с дополнительной возможностью измерений в других модулях РС МКС. В составе космического эксперимента (КЭ) “Матрешка-Р” на РС МКС дозиметр “ТРИТЕЛЬ” эксплуатировался с середины октября 2017 г. до середины октября 2020 г. Подробное описание научной аппаратуры (НА) “ТРИТЕЛЬ” представлено в работе [6].

В данной же статье представлены предварительные результаты обработки дозиметрических данных, полученных при помощи НА “ТРИТЕЛЬ”, описание методики обработки этих данных, а также обсуждаются методические аспекты, связанные с регистрацией поглощенной дозы радиации при помощи одинарных кремниевых полупроводниковых детекторов и при помощи телескопов детекторов, состоящих из двух одинарных кремниевых полупроводниковых детекторов, установленных один под другим и включенных в совпадательный режим регистрации заряженных частиц.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “ТРИТЕЛЬ”

Согласно [6], НА “ТРИТЕЛЬ” предназначена для измерения динамики дозы и анизотропии потоков заряженных частиц на трассе полета орбитальной станции МКС. Аппаратура “ТРИТЕЛЬ” состоит из группы детекторных блоков, и одного интерфейсного блока. Данные, получаемые с помощью НА “ТРИТЕЛЬ”, позволяют проводить изучение динамики поглощенной дозы, изучать спектры энерговыделений и спектры ЛПЭ зарегистрированных потоков космического излучения, определять коэффициенты качества ионизирующих космических излучений, а также — изучать анизотропию потоков ионизирующих излучений на РС МКС. НА “ТРИТЕЛЬ” представляет собой три взаимно перпендикулярных телескопа по два полностью замещенных кремниевых детектора в каждом (тип — CANBERRA, толщина: ~300 мкм [6]). Регистрация частиц ионизирующего излучения в аппаратуре “ТРИТЕЛЬ” производится с использованием именно этих трех телескопов полупроводниковых кремниевых детекторов [6]. Аппаратура “ТРИТЕЛЬ” была установлена в Служебном модуле (СМ) российского сегмента МКС на панелях 221 и 222 по левому борту, между рабочим отсеком большого диаметра и рабочим

отсеком малого диаметра. Внешний вид смонтированной на этих панелях НА “ТРИТЕЛЬ” представлен на рис. 1 (интерфейсный блок и один из трех детекторных блоков, ориентированный по направлению X, показано выносками). Ориентация телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” относительно всей МКС в целом представлена на рис. 2 (приводится согласно [7]). Из рис. 2 видно, что направление Z телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” ориентировано в зенит (от Земли), в то время как направления X и Y ориентированы, учитывая расположение НА “ТРИТЕЛЬ” на левом борту СМ МКС, соответственно, по направлению вектора скорости движения МКС по ее орбите вокруг Земли, и перпендикулярно этому направлению.

Как уже упоминалось, дозиметрическая аппаратура “ТРИТЕЛЬ” позволяет получать данные о потоках космической радиации, регистрируемых этой аппаратурой, — как в виде спектров от срабатываний одиночных детекторов (спектры энерговыделений), так и в виде спектров ЛПЭ, получаемых при срабатывании двух детекторов в режиме совпадений.

Первичные дозиметрические данные НА “ТРИТЕЛЬ” представляют собой закодированные по определенному алгоритму массивы бинарных файлов с расширением *.trt. Научная аппаратура “ТРИТЕЛЬ”, на основе встроенных в ее бортовое программное математическое обеспечение (ПМО) алгоритмов, позволяет автоматически разделять вклад от РПЗ (от внутреннего РПЗ — Южно-Атлантическая Аномалия, далее в тексте ЮАА) и от ГКЛ в получаемые спектры энерговыделений и спектры ЛПЭ. А именно, исходные массивы бинарных файлов с расширением *.trt изначально являются разделенными по четырем категориям: спектры, полученные внутри ЮАА за 90 мин, спектры, полученные от ГКЛ (т.е. вне ЮАА) за 90 мин, спектры, полученные внутри ЮАА за одни сутки, и спектры, полученные от ГКЛ (т.е. вне ЮАА) за одни сутки. Для каждого телескопа детекторов в рамках каждой из четырех категорий в бинарных файлах представлены как данные по энерговыделениям, так и по спектрам ЛПЭ, полученные, соответственно, в режиме регистрации одинарным детектором и в режиме регистрации двумя детекторами телескопа, включенными в схему совпадений.

После программной дешифровки этих данных в текстовый формат представления информации становятся доступными для изучения и анализа данные о спектрах энерговыделений и спектрах ЛПЭ как внутри, так и вне ЮАА, причем с двумя вариантами временного разрешения — 90 мин и одни сутки. Для последующего ана-



Рис. 1. НА «ТРИТЕЛЬ», установленная на панелях 221 и 222 Служебного модуля МКС.

лиза были использованы данные с временным разрешением в одни сутки, как по спектрам энерговыделений, так и по спектрам ЛПЭ, как для случая регистрации потоков космической радиации внутри ЮАА, так и вне ее (от ГКЛ). Прикладное математическое обеспечение, необходимое для извлечения этой информации из бинарных файлов данных *.trt, было разработано с использованием среды визуального программирования National Instruments LabView 2013. Пример результата дешифровки дозиметрических данных НА «ТРИТЕЛЬ» из бинарных фай-

лов данных *.trt в текстовое представление представлен на рис. 3. Структура текстового файла данных, представленного на рис. 3, состоит из заголовка, и из девяти следующих после заголовка столбцов данных. В заголовке показывается тип записанных дозиметрических данных (внутри или вне ЮАА, временное разрешение – 90 мин или одни сутки, в данном случае представлены данные с временным разрешением одни сутки), количество каналов (это значение равно 128), температура детектирующих блоков в градусах Цельсия, момент времени окончания

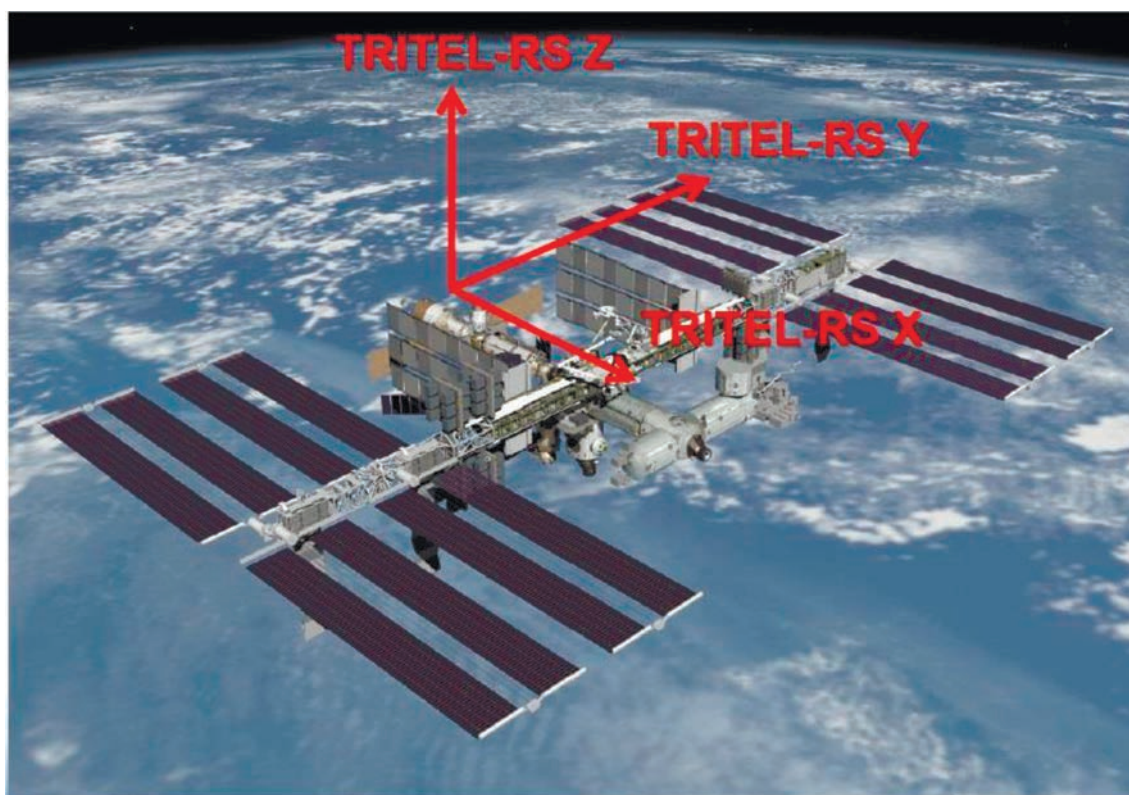


Рис. 2. Ориентация телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” относительно МКС.

регистрации данных детектором). Столбцы же, последовательно, представляют собой (слева направо):

- первый столбец — номера каналов (от 0 до 127)
- второй, третий и четвертый столбцы (детекторные блоки X , Y и Z соответственно) — количество отсчетов в каждом из каналов для режима детектирования ионизирующей радиации одинарными кремниевыми полупроводниковыми детекторами
- пятый, шестой и седьмой столбцы (детекторные блоки X , Y и Z соответственно) — количество отсчетов в каждом из каналов для режима детектирования ионизирующей радиации телескопами кремниевых полупроводниковых детекторов (режим совпадений)
- восьмой и девятый столбцы — служебная техническая информация (номер счетчика и номер интерфейсной платы детектора), для дальнейшего анализа не использовались.

Далее по полученным данным для соответствующих суток вычислялась поглощенная доза (в кремнии). Согласно [8], поглощенная доза ионизирующего излучения D равна отношению средней энергии ΔE , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе Δm вещества в этом объеме: $D = \Delta E / \Delta m$.

Массу Δm “рабочего тела” детектора легко вычислить, исходя из формы детектора (цилиндр) и уточненных данных по его параметрам, которые приводит в дополнениях к документации на аппаратуру “ТРИТЕЛЬ” ее разработчик, МТА ЕК (радиус 8.4 мм, толщина 300 мкм, эффективная площадь поверхности детектора 222 мм²), а также зная плотность кремния $\rho = 2.33$ г/см³. Далее вычислялись зарегистрированные в каждом из каналов анализатора энергосчетчика количества отсчетов на значение калибровочной кривой, соответствующее номеру канала, для которого вычисляется энергосчетчик (всего каналов, как уже упоминалось, 128). Средняя энергия ΔE вычислялась как сумма всех этих произведений (энергосчетчиков, зарегистрированных в каждом из 128 каналов анализатора). Кривые калибровок детектирующих блоков дозиметра “ТРИТЕЛЬ” были предоставлены нам нашими венгерскими коллегами — разработчиками НА “ТРИТЕЛЬ” (рис. 4) для всех трех взаимно ортогональных блоков детектирования. Необходимо уточнить, что численные значения калибровок настолько близки друг к другу, что, будучи представленными на графике, эти данные практически сливаются между собой.

TRITEL Spectrum Type: s (inside SAA)
Channels: 128
Temp X: 30.50
Temp Y: 29.50
Temp Z: 29.00
Stop time: 06.10.2020 0:00:00

Channel_number	Spectrum_X	Spectrum_Y	Spectrum_Z	Sp_COINC_X	Sp_COINC_Y	Sp_COINC_Z	Counter	IU_ID
0	0	0	0	0	0	0	0	15
1	4	1	1	4	0	0	0	15
2	1	1	1	0	0	1	0	15
3	7	2	0	7	1	0	0	15
4	18	0	2	12	0	2	0	15
5	74	1	5	39	1	2	0	15
6	150	4	31	81	3	12	0	15
7	395	21	84	209	12	35	0	15
8	559	74	170	311	33	81	0	15
9	708	169	323	360	88	160	0	15
10	624	347	451	294	181	207	0	15
11	734	732	775	316	335	359	0	15
12	385	872	637	169	394	265	0	15
13	221	567	321	80	215	106	0	15
14	155	372	232	62	116	84	0	15
15	113	195	161	27	69	49	0	15
16	108	178	133	32	49	31	0	15
17	68	126	113	27	31	33	0	15
18	52	85	67	20	26	17	0	15
19	53	71	63	16	17	19	0	15
20	51	64	63	15	24	20	0	15
21	43	55	69	13	12	11	0	15
22	32	53	48	9	10	11	0	15
23	40	56	44	15	15	6	0	15
24	44	66	29	12	25	5	0	15
25	42	31	59	15	7	17	0	15
26	41	42	28	13	12	8	0	15
27	28	48	47	7	14	12	0	15
28	37	41	42	10	11	13	0	15
29	36	30	40	12	10	11	0	15
30	37	30	30	14	10	9	0	15
~~~~~								
122	1	0	0	1	0	0	0	15
123	0	0	0	0	0	0	0	15
124	0	0	0	0	0	0	0	15
125	0	0	0	0	0	0	0	15
126	0	0	0	0	0	0	0	15
127	0	0	1	0	0	1	0	15

Рис. 3. Пример дешифровки дозиметрических данных НА “ТРИТЕЛЬ” из файлов данных *.trt.

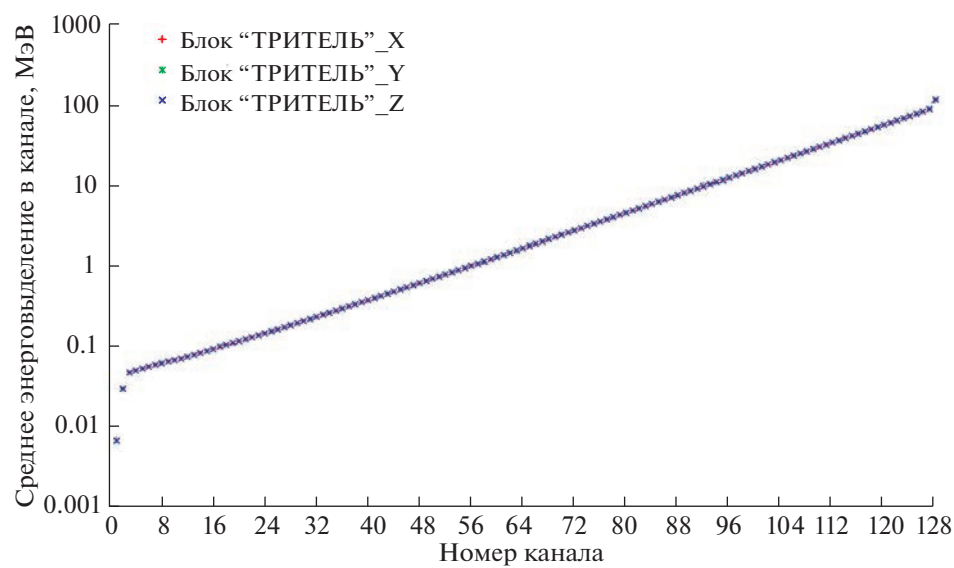
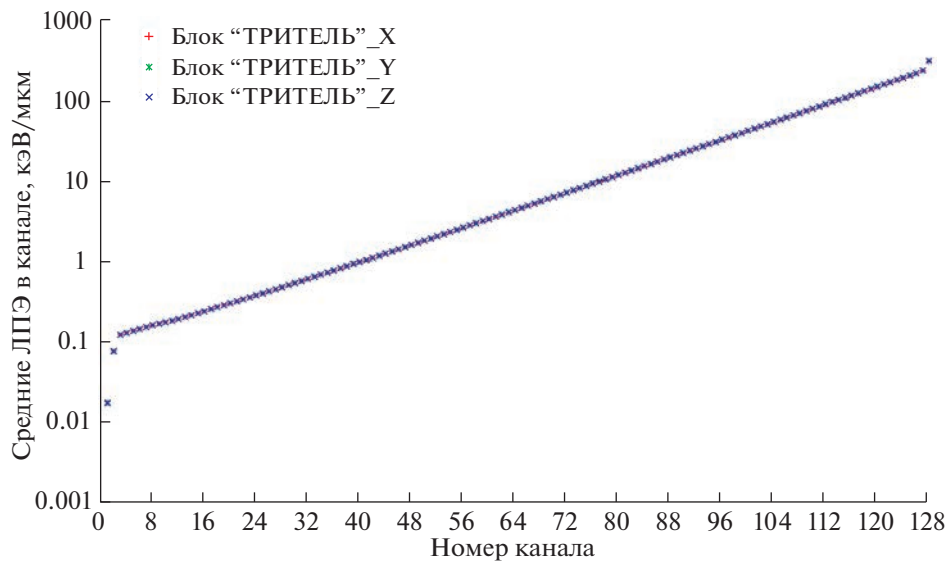


Рис. 4. Калибровочные кривые (по энерговыделениям) трех взаимно перпендикулярных блоков детектирования дозиметрической аппаратуры “ТРИТЕЛЬ”.



**Рис. 5.** Калибровочные кривые (по ЛПЭ) трех взаимно перпендикулярных блоков детектирования дозиметрической аппаратуры “ТРИТЕЛЬ”.

Таким образом, поглощенная доза в единицах измерения мГр, которую зарегистрировал одиночный детектор каждого из трех дозиметрических блоков НА “ТРИТЕЛЬ”, может быть получена как отношение уже вычисленной нами средней энергии  $\Delta E$  к также уже известной нам массе детектора  $\Delta m$ , и домноженное на численный коэффициент, позволяющий преобразовать мегаэлектрон-вольты в джоули (для получения итогового значения поглощенной дозы в мГр этот коэффициент будет равен  $1.6 \cdot 10^{-10}$ ). Для того, чтобы получить окончательный результат в виде временной зависимости суточной мощности дозы, по вышеописанному алгоритму по спектрам энерговыделений отдельно рассчитывались дозы внутри и вне ЮАА, а затем они суммировались, давая в итоге полную суточную мощность дозы.

Также была вычислена поглощенная доза с использованием полученных с телескопов полупроводниковых кремниевых детекторов данных по спектрам ЛПЭ. Согласно методике, представленной в работе [9], поглощенная доза в этом случае может быть вычислена по формуле (1):

$$D = 4\pi \times 1.6 \cdot 10^{-6} \times \frac{1}{\rho} \times \frac{1}{G} \times \int_{l_0}^{l_{\max}} (F(l) \times l) dl, \quad (1)$$

где  $D$  — поглощенная доза в кремнии;  $\rho$  — плотность кремния ( $2.33 \text{ г/см}^3$ );  $G$  — геометрический фактор телескопа детекторов (по уточненным данным, которые приводит в дополнениях к документации на НА “ТРИТЕЛЬ” ее разработчик, МТА ЕК, он равен  $5.1 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ );  $F(l)$  — количество

отсчетов счета в соответствующем канале;  $l$  — средние ЛПЭ для соответствующего канала по данным калибровочных кривых;  $l_0, l_{\max}$  — минимальный и максимальный канал анализатора (1 и 128 канал соответственно).

Именно эта формула и была использована для расчета поглощенной дозы по спектрам ЛПЭ, полученным телескопами детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”. Как и в случае с расчетом поглощенной дозы по данным одинарных детекторов, расчеты поглощенной дозы по двум детекторам, включенным в совпадательный режим (телескопы), велись по спектрам ЛПЭ, полученным по отдельности внутри и вне ЮАА, а после этого результаты суммировались, образуя полную суточную мощность дозы. После этого была построена временная зависимость полной суточной мощности дозы, полученной по данным телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”.

Кривые ЛПЭ — калибровок (рис. 5) детектирующих блоков дозиметра “ТРИТЕЛЬ”, необходимые для этих расчетов, были получены из предоставленных нам нашими венгерскими коллегами — разработчиками НА “ТРИТЕЛЬ” данных по значениям энерговыделений в каналах и из определения ЛПЭ как физической величины согласно [7], путем учета толщины детектора (300 мкм) в качестве единицы длины пути заряженной частицы в веществе детектора и поправочного коэффициента, позволяющего учесть в итоговом численном значении ЛПЭ регистрацию детектором т.н. косых прохождений (т.е. заряженных частиц, налетающих под острым углом к плоскости поверхности детектора, и при этом

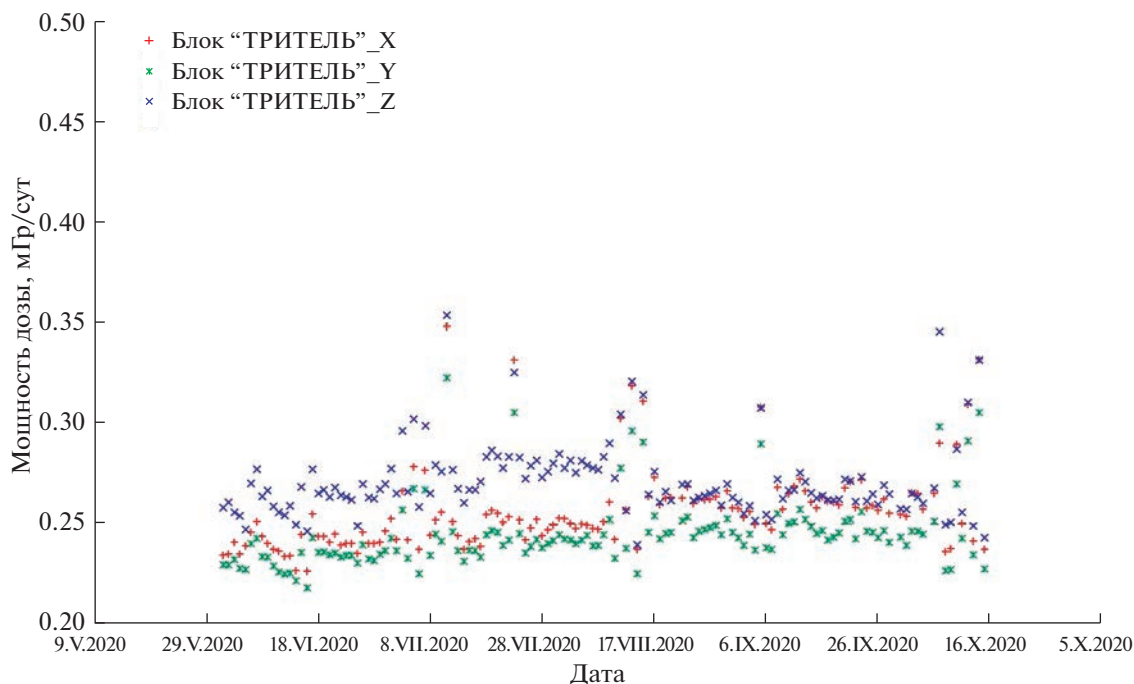


Рис. 6. Временная зависимость суточной мощности дозы, полученной по данным одиночных детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”.

проходящих через оба детектора телескопа). Значение этого поправочного коэффициента для радиуса детекторов 8.4 мм и расстояния между ними 8.9 мм (уточненное значение расстояния между детекторами телескопа получено от разработчиков НА “ТРИТЕЛЬ”) составляет 1.198. При этом, как и для случая с калибровками по энерговыделениям, необходимо уточнить, что численные значения ЛПЭ – калибровок на рис. 5 настолько близки друг к другу, что, будучи представленными на графике, эти данные практически сливаются между собой.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ “ТРИТЕЛЬ” И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6 представлена временная зависимость суточной мощности дозы, полученной по данным одиночных детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”. Были использованы полученные в результате обработки по представленной выше методике дозиметрические данные для временного интервала с 1.VI.2020 по 15.X.2020. На рис. 7 представлена аналогичная зависимость, полученная в результате обработки данных телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”, для того же самого временного интервала (с 1.VI.2020 по 15.X.2020). На рис. 8 приведена временная зависимость высоты орбиты МКС (высота апогея и высота перигея орбиты). На рис. 9 в качестве примера приве-

дены спектры ЛПЭ, полученные телескопами детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” вне ЮАА (панель (а) рис. 9) и внутри ЮАА (панель (б) рис. 9) за одни сутки с 00:00, 6 октября 2020 г. по 00:00, 7 октября 2020 г.

Из рис. 7 становится отчетливо видимой анизотропия дозового поля в области, в которой смонтированы на РС МКС детекторные блоки НА “ТРИТЕЛЬ”: дозовая нагрузка с направления  $Y$  примерно на 30–35% выше, чем аналогичная нагрузка с направлений  $X$  и  $Z$ . Аналогичные расхождения в дозиметрических данных, полученных в результате обработки показаний одиночных детекторов, существенно меньше, и они укладываются в погрешность определения дозы детекторами НА “ТРИТЕЛЬ” (согласно [6], это значение равно 20%). Тем не менее, следует отметить, что из сравнения рис. 6 и рис. 7 видно, что более высокие значения мощности доз на рис. 6 демонстрирует направление  $Z$ , в то время как из рис. 7 следует, что более высокие дозовые нагрузки регистрируются с направления  $Y$ . Аналогичным образом, наименьшие потоки космической радиации также фиксируются с различных направлений: по данным с одиночных детекторов (рис. 6), это направление  $Y$ , а по данным с телескопов детекторов (рис. 7) – это направление  $X$ .

Подобная “странность” в проявлении эффектов анизотропии становится более понятной, ес-

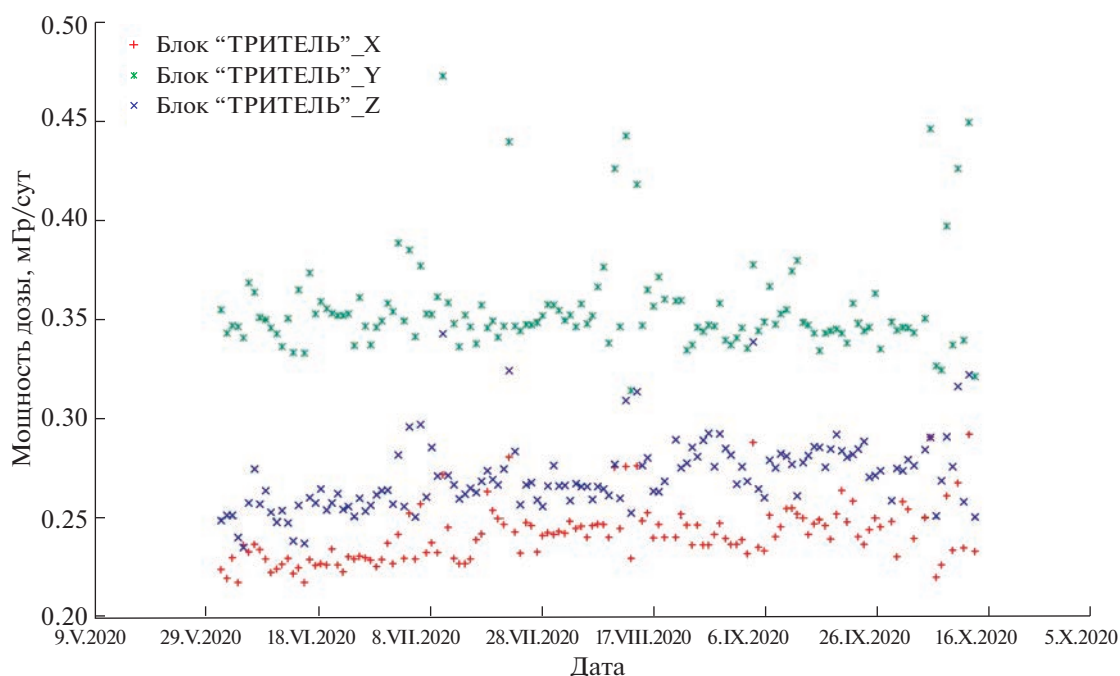


Рис. 7. Временная зависимость суточной мощности дозы, полученной по данным телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ”.

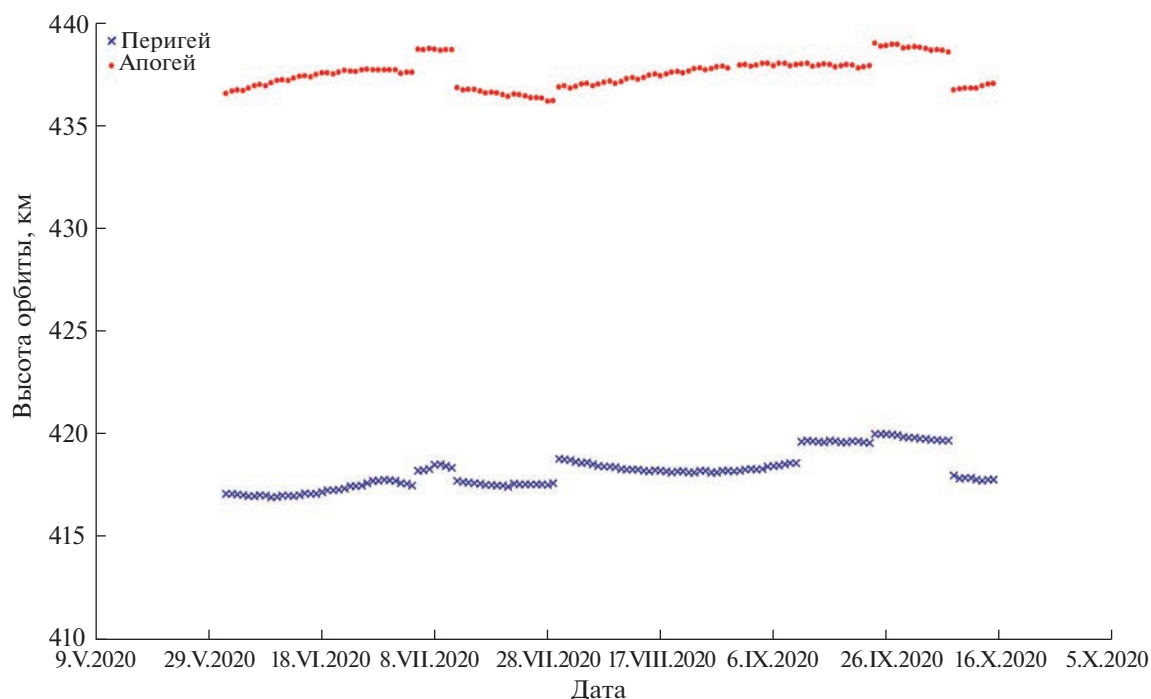
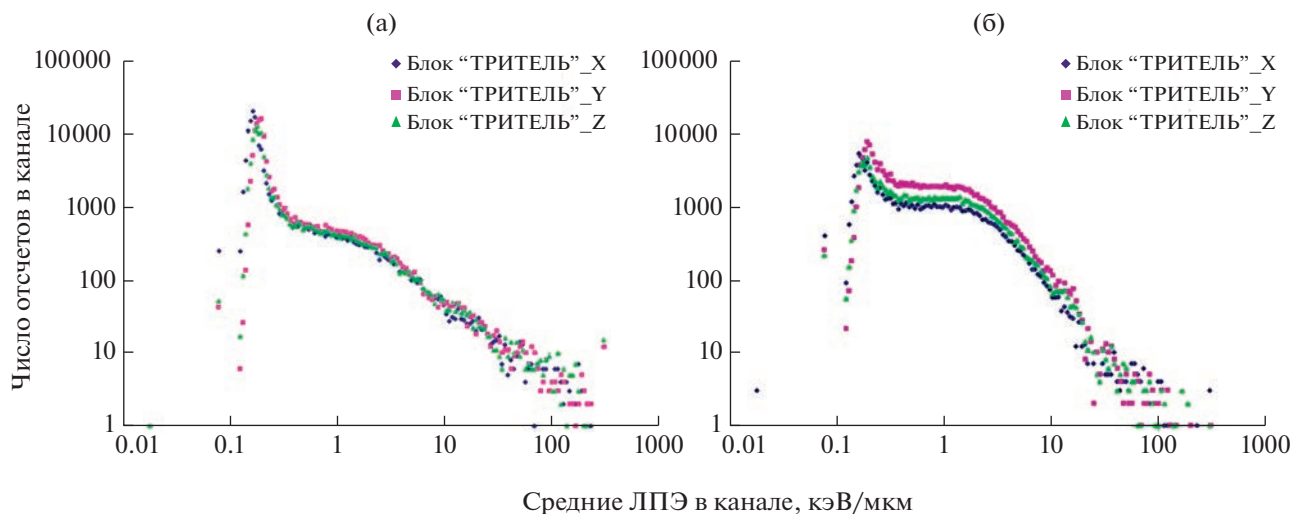


Рис. 8. Временная зависимость высоты орбиты МКС (апогей и перигей).

ли от ориентации телескопов детекторов ( $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ) перейти к их защищенности с учетом их ориентации в пространстве. Как уже упоминалось, из рис. 2 видно, что направление  $Z$  телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” ориентировано в зенит

(от Земли) и, таким образом, этот телескоп детекторов защищен практически только одним лишь потолком СМ МКС и оборудованием, смонтированным на потолке в районе панелей 221 и 222. Направление  $X$  ориентировано вдоль оси станции



**Рис. 9.** Примеры спектров ЛПЭ, зарегистрированных НА “ТРИТЕЛЬ” (панель (а) — вне области ЮАА, панель (б) — внутри этой области).

по направлению вектора скорости движения МКС и из рис. 2 следует, что телескоп детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” с этого направления защищает практически вся станция МКС и все оборудование, расположенное в отсеках станции, смонтированных спереди от Служебного модуля МКС. Направление же  $Y$ , — следует из рис. 2, — ориентировано перпендикулярно направлению вектора скорости движения МКС по ее орбите вокруг Земли, а учитывая, что НА “ТРИТЕЛЬ” смонтирована на левом борту СМ МКС, оказывается, что с этого направления телескоп детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” защищает лишь обшивка Служебного модуля МКС, запанельное оборудование и материал панелей, на которых смонтирована НА “ТРИТЕЛЬ” внутри этого модуля.

Таким образом, максимальные значения мощности дозы с направления  $Y$ , видимые на рис. 7, могут объясняться минимальной из всех трех взаимно ортогональных вариантов ориентации телескопов детекторов ( $X$ ,  $Y$  и  $Z$ ) защищенностью детектора окружающим оборудованием станции. Минимальные же значения мощности дозы, зарегистрированные с направления  $X$  и видимые на рис. 7, объясняются тем, что на этом направлении защищенность детектора является максимальной (как уже упоминалось, с этого направления детектор защищает практически вся станция МКС). Зарегистрированные же одиночными детекторами (рис. 6) значения мощности дозы оказываются очень близкими, что обуславливается практически изотропной чувствительностью одиночных детекторов к поглощенной дозе для различных направлений регистрации налетающих частиц. Видимые на рис. 6 наиболее высокие значения мощности

доз, зарегистрированные с направления  $Z$ , учитывая аспект ориентации детектора и его защищенности с этого направления, хотя и очевидным образом связаны с потоками космической радиации с направления на зенит (от Земли), но вполне при этом укладываются в 20%-ю погрешность определения дозы детекторами НА “ТРИТЕЛЬ”.

Переход от анализа суточных временных зависимостей к анализу спектров ЛПЭ, один из которых, как уже упоминалось, в качестве примера представлен на рис. 9, позволяет прийти к примерно аналогичным выводам: спектры, регистрируемые аппаратурой вне области ЮАА, панель (а), со всех трех взаимно ортогональных направлений расположения детекторов практически не отличаются друг от друга. Это вполне объяснимо, поскольку вне области ЮАА основную роль играют потоки частиц ГКЛ с энергиями, значительно превышающими энергии заряженных частиц, захваченных во внутренний РПЗ; поэтому для частиц ГКЛ степень защищенности детекторов не играет существенной роли. Возможная анизотропия потоков ГКЛ, обусловленная условиями их проникновения в геомагнитное поле Земли, также не оказывает на зарегистрированные спектры существенного влияния вследствие усреднения регистрируемых показаний за время их регистрации детекторами (поскольку время набора анализируемых спектров ЛПЭ для каждого из трех телескопов детекторов составляет одни сутки). Напротив, спектры, зарегистрированные во внутреннем РПЗ с тем же самым временным разрешением в одни сутки, панель (б), демонстрируют явно видимую анизотропию дозового поля: детекторы, “смотрящие” в направлении левого борта СМ

МКС, с этого направления регистрируют значительно большее количество частиц, чем детекторы, регистрирующие потоки заряженных частиц с двух других направлений. Объясняется это может как регистрацией реальной анизотропии потоков космической радиации внутри области ЮАА, так и особенностями условий защищенности телескопов детекторов НА “ТРИТЕЛЬ” окружающим оборудованием и конструкциями станции в точках, где эти детекторы смонтированы внутри СМ МКС. Чтобы прояснить этот вопрос, необходим анализ диаграмм защищенности детекторов. Следует отметить, что расчет и изучение диаграмм защищенности детекторов выходит за рамки данной статьи, и планируется для дальнейших работ по данной тематике. В целом же можно заключить, что метод изучения анизотропии потоков ионизирующей космической радиации с помощью телескопов детекторов показал большую эффективность в сравнении с регистрацией космической радиации одиночными детекторами.

На рис. 6 и рис. 7 также обращают на себя внимание относительно резкие увеличения мощности дозы на общем фоне зарегистрированных НА “ТРИТЕЛЬ” данных. Чтобы определить возможные причины этого, нами было проведено сравнение зарегистрированных детекторами НА “ТРИТЕЛЬ” показаний с гелиогеофизическими параметрами космической погоды: с данными нейтронного монитора (г. Апатиты, Россия), а также с данными по потокам протонов с энергией больше 10, 50 и 100 МэВ, зарегистрированных спутниками серии *GOES* на геостационарной орбите. К сожалению, это сравнение не позволило сделать сколь-либо однозначных выводов о причинах этих увеличений. По некоторым литературным данным [10, 11] известно, что подобные увеличения мощности дозы могут быть связаны с регистрацией высыпаний заряженных частиц из внешнего радиационного пояса Земли. Но детальное изучение этого аспекта применительно к дозиметрической информации, полученной НА “ТРИТЕЛЬ”, выходит за рамки этой статьи, и эти изыскания предполагается провести уже в следующих работах, посвященных данной тематике.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предварительные результаты обработки дозиметрических данных прибора “ТРИТЕЛЬ” показывают, что НА “ТРИТЕЛЬ” позволила получить достаточно корректные данные по анизотропии потоков ионизирующей космической радиации в Служебном моду-

ле российского сегмента *Международной космической станции*. Использование методики телескопов детекторов для оценки неравномерности вкладов в поглощенную дозу потоков радиации, приходящих с различных направлений, демонстрирует большую эффективность в сравнении с регистрацией потоков космической радиации одиночными детекторами. Также результаты обработки данных прибора “ТРИТЕЛЬ” показывают, что, возможно, благодаря чувствительности этого прибора удалось зарегистрировать мощности дозы, связанные с высыпаниями заряженных частиц из внешнего радиационного пояса Земли. Полученные предварительные результаты обработки данных НА “ТРИТЕЛЬ” позволяют рассчитывать на успешную обработку всего массива дозиметрических данных НА “ТРИТЕЛЬ” за все то время, в течение которого проводился этот эксперимент на борту *РС МКС*. Полученные результаты создают большие перспективы для дальнейшего изучения различных аспектов проявления космической радиации на борту Служебного модуля российского сегмента *Международной космической станции*.

Авторы благодарят Виктора Владимировича Бенгина за продуктивное совместное обсуждение результатов исследования.

Настоящая работа выполнена в рамках базовой НИР РАН № 65.2.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25645.203-83. Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Модель тела человека для расчета тканевой дозы. М.: Госстандарт, 1984.
2. *Мирошниченко Л.И., Петров В.М.* Динамика радиационных условий в космосе. М.: Энергоатомиздат, 1985. 148 с.
3. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP. 1991. V. 21.
4. Плазменная гелиогеофизика: в 2 т. / Под ред. Л.М. Зеленого; И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 193–202.
5. *Авакян С.В., Вдовин А.И., Пустарнаков В.Ф.* Ионизирующие и проникающие излучения в околоземном космическом пространстве. Спб.: Гидрометеоиздат, 1994.
6. *Лишневский А.Э., Иванова О.А., Hirn A. и др.* Дозиметр “ТРИТЕЛЬ” в составе космического эксперимента “Матрешка-Р”: новые возможности для контроля радиационных условий на борту российского сегмента Международной космической станции // Приборы. 2020. № 12. С. 14–21.
7. *Hirn A., Apáthy I., Bodnár L. et al.* TRITEL measurements in the Russian Service Module (April–July 2013). 20th Workshop on Radiation Monitoring for the

- International Space Station, 8–10 September 2015, Cologne, Germany [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://wrmiss.org/workshops/twentieth/Hirn_TRITEL.pdf](https://wrmiss.org/workshops/twentieth/Hirn_TRITEL.pdf) (дата обращения: 18.01.2023).
8. Физические величины: справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 21.
  9. *Palfalvi J.K.* Fluence and dose of mixed space radiation by SSNTDs achievements and constraints // *Radiation Measurements*. 2009. V. 44. P. 724–728.
  10. *Dachev T.P., Tomov B., Matviichuk Y. et al.* Relativistic electrons high doses at International Space Station and Foton M2/M3 satellites // *Adv. Sp. Res.* 2009. V. 44. I. 12. P. 1433–1440.
  11. *Antonyuk G.I., Benghin V.V., Dachev T.P. et al.* Dose Rate Bursts Onboard the ISS and the “Lomonosov” Satellite in the Earth’s Outer Radiation Belt // *Problems of Geocosmos - 2020. Part of the Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences book series (SPEES)*. 2022. P. 351–363.