

ПОВЕДЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ Fe/O КАК ПОКАЗАТЕЛЯ СОСТОЯНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПРОЯВЛЕНИЯХ АКТИВНОСТИ И В ПЕРИОДЫ ЕЕ ОТСУТСТВИЯ

Fe/O RATIO BEHAVIOR AS AN INDICATOR OF SOLAR PLASMA STATE AT DIFFERENT SOLAR ACTIVITY MANIFESTATIONS AND IN PERIODS OF THEIR ABSENCE

Г.С. Минасянц

*Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова НАН РК,
Алматы, Казахстан, gennadii_minasya@mail.ru*

Т.М. Минасянц

*Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова НАН РК,
Алматы, Казахстан, gennadii_minasya@mail.ru*

В.М. Томозов

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

G.S. Minasyants

*Fesenkov Astrophysical Institute,
Almaty, Kazakhstan, gennadii_minasya@mail.ru*

T.M. Minasyants

*Fesenkov Astrophysical Institute,
Almaty, Kazakhstan, gennadii_minasya@mail.ru*

V.M. Tomozov

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

Аннотация. Представлены результаты исследования физических характеристик плазмы при различных проявлениях солнечной активности и ее отсутствии с помощью количественных оценок относительного содержания примесных ионов Fe и O в разных интервалах энергий. Показано, что максимальные значения отношения Fe/O соответствуют потокам частиц от импульсных вспышек для ионов с энергиями <2 МэВ/н (наиболее существенное проявление FIP-эффекта). В потоках частиц от длительных вспышек значение Fe/O плавно спадает с энергией ионов и заметно меньше значений потоков в импульсных событиях. Было установлено, что свойства вспышек солнечных космических лучей (СКЛ) указывают на их принадлежность к отдельному подклассу (GLE, ground level events) в общей совокупности длительных событий. На основе динамики Fe/O предложено объяснение поведения солнечной плазмы при развитии вспышек обоих классов.

Магнитные облака, как отдельный вид корональных выбросов массы (КВМ), имеющие области турбулентного сжатия и являющиеся источниками сильных геомагнитных бурь, демонстрируют относительное содержание ионов Fe, сопоставимое с обилием Fe в потоках ионов от длительных вспышек.

Установлено, что по величине отношения Fe/O можно выявить проникновение энергичной вспышечной плазмы в тело КВМ на начальной фазе его развития, а также оценить ее относительный вклад.

В период минимума цикла активности с полным отсутствием пятен на Солнце отношение Fe/O на расстоянии 1 а. е. показывает абсолютно низкие значения $\text{Fe/O} = 0.004 \div 0.010$ в интервале энергий от 2–5 до 30 МэВ/н. Это связано с проявлением аномальной компоненты КЛ (АКЛ), что приводит к усилению потоков ионов с высоким первым потенциалом иони-

Abstract. We report the results of the investigation into plasma physical characteristics at various solar activity manifestations and in periods of their absence. These results have been obtained from quantitative estimates of the relative abundance of Fe/O ions in different energy ranges. Maximum values of the Fe/O ratio is shown to correspond to particle fluxes from impulsive flares for ions with energies <2 MeV/n (the most significant manifestation of the FIP effect). In particle fluxes from gradual flares, the Fe/O value decreases smoothly with ion energy and is noticeably inferior to values of fluxes in impulsive events. We have established that the properties of flares of solar cosmic rays indicate their belonging to a separate subclass in the total population of gradual events. Relying on variations in the abundance of Fe/O ions, we propose an explanation of the solar plasma behavior during the development of flares of both classes.

Magnetic clouds (a separate type of coronal mass ejections (CME)), which have regions of turbulent compression and are sources of strong geomagnetic storms, exhibit a relative composition of Fe ions comparable to the abundance of Fe in ion fluxes from gradual flares.

We have found out that the Fe/O value can be used to detect penetration of energetic flare plasma into the CME body at the initial phase of their joint development and to estimate its relative contribution.

During solar minimum with complete absence of sunspots, the Fe/O ratio during periods of “quiet” solar wind show absolutely low values of $\text{Fe/O} = 0.004 \div 0.010$ in the energy range from 2–5 to 30 MeV/n. This is associated with the manifestation of the cosmic ray anomalous component, which causes an increase in the intensity of ion fluxes with a high first ionization potential, including oxygen (O), and elements with a low first ionization potential (Fe) demonstrate weakening of the fluxes. As

зации (FIP — first ionization potential), в том числе кислорода (O), а элементы с низким FIP (Fe) демонстрируют ослабление потоков. Что касается частиц с более высокой кинетической энергией ($E_k > 30$ МэВ/н), рост значений Fe/O связан с определяющим влиянием галактических космических лучей КЛ (ГКЛ) на состав примесных элементов в условиях минимума активности. При этом относительное содержание тяжелых элементов в ГКЛ 30–500 МэВ/н подобно значениям в потоках длительных вспышечных событий при высокой активности Солнца.

В период минимума активности с отсутствием пятен на Солнце поведение Fe/O для разных интервалов энергий ионов в течениях плазмы из корональных дыр (КД) и в солнечном ветре (СВ) показывает лишь незначительные отклонения. В то же время потоки плазмы, связанные с возмущенной передней областью КД, могут быть источниками возникновения умеренных геомагнитных бурь.

Ключевые слова: солнечная активность, энергетические спектры, FIP-эффект, отношение Fe/O.

1. ВВЕДЕНИЕ

Солнце обладает обширным по своим характеристикам диапазоном активных явлений. Наиболее мощными являются солнечные вспышки, которые часто сопровождаются корональными выбросами массы (КВМ). Эти процессы в основном и определяют состояние космической погоды. По целому ряду параметров вспышки разделяются на два класса. Относительно компактные и кратковременные вспышки относятся к импульсным событиям, а занимающие больший объем солнечной атмосферы продолжительные явления — к длительным вспышкам. Импульсные вспышки приводят к сильному возрастанию отношения изотопов $^3\text{He}/^4\text{He}$ (относительно корональных значений усиление в 10^3 раз), а также к высокому отношению Fe/O ~ 1.3 и большому зарядовым состояниям ионов (например, $Q(\text{Fe}) > 16$), что свидетельствует о высокой температуре в области их источников.

Основным процессом ускорения солнечных энергичных частиц непосредственно в области вспышек является прямое ускорение электрическим полем при диссипации магнитных полей в токовых слоях активной области в зоне магнитного пересоединения с последующим стохастическим ускорением вследствие развития различных плазменных неустойчивостей [Алтынцев и др., 1982; Прист, Форбс, 2005; Somov, 2013].

Длительные вспышки возникают в большом объеме солнечной короны вследствие динамической перестройки структуры магнитных полей и в течение нескольких часов демонстрируют повышенное излучение в наиболее энергичных диапазонах спектра. Дополнительным источником ускорения частиц, связанным с развитием высокоскоростных КВМ, может быть появление ударных волн в верхних слоях короны и в межпланетной среде. Потоки вспышеч-

ных частиц с более высокими энергиями ($E_k > 30$ МэВ/н), рост Fe/O обусловлен решающим влиянием галактических космических лучей на состав примесных элементов в солнечном ветре в условиях минимума активности. Сходство значений Fe/O в потоках от постепенных вспышек во время высокой солнечной активности.

В период минимума активности без солнечных пятен, поведение Fe/O для разных энергетических диапазонов ионов в плазме из корональных дыр (КД) и в солнечном ветре (СВ) показывает лишь незначительные отклонения. В то же время потоки плазмы, связанные с возмущенной передней областью КД, могут быть источниками возникновения умеренных геомагнитных бурь.

Keywords: solar activity, energy spectra, FIP effect, Fe/O ratio

ных ускоренных частиц в длительных событиях обеднены электронами и обогащены энергичными протонами. В таких явлениях наблюдается понижение отношения Fe/O ~ 0.1 по сравнению с импульсными событиями и меньшие зарядовые состояния ионов $Q(\text{Fe}) \sim 14$, соответствующие корональным температурам $(2-3) \cdot 10^6$ К [Li, Zank, 2005].

Приведенные характерные значения некоторых параметров позволяют установить принадлежность вспышек к тому или иному классу [Reames, 1995], хотя в настоящее время считается, что представление о делении вспышек и потоков частиц от них на два класса является несколько упрощенным [Klecker, 2013], поскольку в некоторых явлениях разных классов наблюдается ряд общих признаков.

Для солнечных вспышек представленных классов проведено исследование состава ускоренных частиц плазмы с помощью анализа энергетических спектров ионов Fe и O в широком интервале энергий и полученных с их помощью значений Fe/O.

Отношение Fe/O является хорошим индикатором физического состояния изучаемой среды и мерой проявления FIP-эффекта, суть которого состоит в следующем. Состав элементов в фотосфере, достаточно надежно определяемый спектроскопическими методами, является вполне однородным по всей видимой солнечной поверхности, однако обилие примесных элементов в структурных образованиях короны Солнца и в СВ оказывается в разной степени зависящим от величины FIP по отношению к их концентрациям в фотосфере. Установлено, что фракционирование примесных элементов по признаку FIP осуществляется в верхней области хромосферы Солнца. Элементы с низким FIP (< 10 эВ — Fe, Mg, Si, K и др.) легко ионизируются и выносятся под действием ponderomotorной силы альвеновских волн в верхнюю атмосферу Солнца [Laming, 2004], где эти ионы способны накапливаться преимущественно в централь-

ных частях замкнутых магнитных структур активных областей. Альфеновские волны генерируются в подножиях этих структур под влиянием случайных движений плазмы в фотосферных слоях. Элементы с высоким FIP (>10 эВ — C, N, O и др.) остаются нейтральными и их содержание не изменяется. Обилие ионов Fe как элемента с низким FIP (<10 эВ) в верхней атмосфере Солнца повышено в несколько раз, в то время как содержание O остается близким фотосферному, поскольку его FIP превышает 10 эВ [Томозов, 2012; 2013]. Ранее в работах [Reames et al., 1994; Reames, Ng, 2004; Tylka et al., 2005; Wang et al., 2006; Kahler et al., 2012] приводились результаты определений значений Fe/O в потоках ускоренных частиц от различных солнечных вспышек. Измерения отношения Fe/O выполнялись лишь в одном или двух интервалах энергий ионов, что оказывается недостаточным для выявления зависимости Fe/O от энергии. Вследствие этого представляется важным получение количественных оценок отношения Fe/O в целом ряде интервалов энергий для различных событий, что позволит выявить новые свойства потоков частиц.

Для построения спектров энергий ионов нами были использованы данные наблюдений Солнца на космических аппаратах (КА) ACE/(ULEIS, EPAM, SIS, CRIS), WIND/EPACT/LEMT. Общий диапазон энергий частиц составил 0.04–287.23 МэВ/н. Было выбрано семь отдельных диапазонов энергий со средними значениями 0.06, 0.23, 1.81, 5.30, 13.00, 30.90 и 75.69 МэВ/н. Энергетические спектры ионов O и Fe в потоках частиц с временным разрешением 1 ч были получены с помощью опции «Multi-source spectral plots of energetic particle fluxes» на сайте OMNI Web Plus Browser [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/flux_spectr_m.html]. Энергия ионов выражена в МэВ/н, потоков — в $1/(\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{МэВ/н})$. С использованием значений потоков ионов Fe и O было рассчитано их относительное содержание в потоках частиц в семи интервалах энергий.

Целью настоящей работы является исследование характеристик активных процессов на Солнце, включая вспышки и KBM, а также особенностей состава солнечной плазмы при отсутствии активных областей по динамике отношения Fe/O с использованием данных наблюдений КА вблизи орбиты Земли.

2. ИЗМЕНЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ Fe/O С ЭНЕРГИЕЙ ИОНОВ ВО ВСПЫШЕЧНЫХ ПОТОКАХ УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ

2.1. Возмущенная стадия развития вспышечных потоков

С помощью построения энергетических спектров ионов были изучены вспышечные потоки энергичных частиц за 1997–2007 гг. При сканировании энергетических спектров ионов с высоким временным разрешением 1 ч удалось выявить новое характерное свойство в развитии мощных вспышечных потоков, а именно, наличие возмущенной и спокойной стадий [Минасянц, Минасянц, 2014]. На примере события 2–4 ноября 2003 г. показано поведение

спектров ионов H, He, O, Fe в период развития вспышки (рис. 1). В 17:00–17:59 UT 2 ноября начало развития вспышки соответствует заметному усилению числа протонов при $E_k > 100$ МэВ/н. Спустя 1 ч (рис. 1, а) спектры энергий ионов принимают куполообразную форму с максимумом потока на $E_k \sim (30 \div 40)$ МэВ/н. Увеличение интенсивности 2 ноября в 21:00–21:59 UT принимает дугообразную форму с максимумом при $E_k \sim (2 \div 3)$ МэВ/н (рис. 1, б). Постепенно максимум дуги смещается в сторону меньших энергий, и в 03:00–03:59 UT 4 ноября регистрируется усиление потока частиц низких энергий с максимумом при $E_k \sim (0.3 \div 0.6)$ МэВ/н (рис. 1, в). Наконец, в 06:00–06:59 UT 4 ноября наблюдается усиление потока частиц с $E_k < 0.3$ МэВ/н (рис. 1, г) — возмущенная стадия заканчивается, кривые энергетических спектров становятся гладкими. В завершающей спокойной стадии спада вспышечного потока (до 20:00–20:59 UT 4 ноября), происходило постепенное ослабление интенсивности частиц различных энергий до фоновых значений.

Таким образом, в возмущенный период в энергетических спектрах (в частности, для ионов Fe и O) регистрируются искажения их формы в виде дугообразных изгибов. Это свидетельствует о приходе вспышечных ускоренных частиц. В начале возмущенного периода первыми регистрируются частицы с наибольшими энергиями (в данном случае — сотни МэВ/н). В ходе эволюции спектра характерные искажения последовательно смещаются в сторону меньших энергий (десятки и единицы МэВ/н), формируя изгибную форму спектра вплоть до энергий несколько десятков кэВ. Получаемые таким образом отношения Fe/O содержат больше информации о параметрах области ускорения и межпланетной среды, в которой распространяются ускоренные частицы. После окончания возмущенной стадии спектры энергии ионов в период спокойного развития вспышечных потоков приобретают достаточно гладкий вид и их интенсивности плавно спадают к фоновым значениям. При построении энергетического спектра на основе интегрирования по всему интервалу времени существования вспышечного потока возможна потеря сведений о свойствах и физических особенностях процессов ускорения и распространения вспышечных частиц.

На примере события 14 июля 2000 г. (рис. 2) рассмотрены также свойства временных профилей потоков протонов (а), ионов O и Fe (б) в возмущенной стадии вспышечного потока. Распределение временных профилей потоков частиц для различных энергий далеко от типичного, особенно в низкоэнергетическом интервале. В начале возмущенной стадии при стремительном нарастании потока ионов высоких энергий одновременно происходит спад потока низкоэнергичных частиц. При этом значения потока протонов с $E_k = 25.92$ МэВ/н в течение почти всей возмущенной стадии потока превышают соответствующие интенсивности протонов с $E_k = 0.23$ МэВ/н.

Картина распределения временных профилей потоков для ионов O и Fe качественно согласуется с

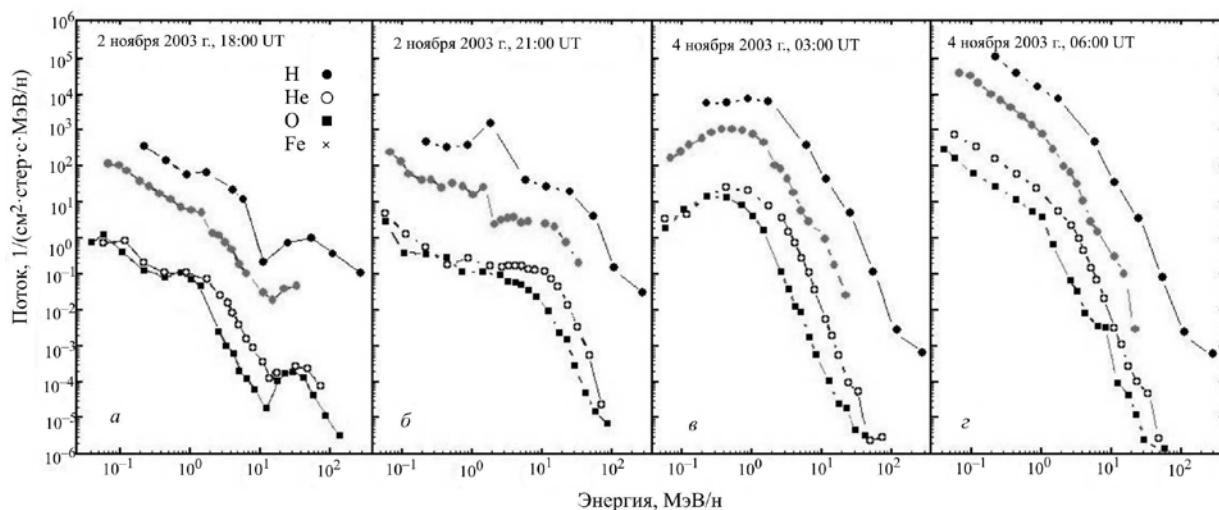


Рис. 1. Энергетические спектры ионов H, He, O, Fe во вспыхивающих потоках 2–4 ноября 2003 г.: а — 2 ноября, 18:00–18:59 UT; б — 2 ноября, 21:00–21:59 UT; в — 4 ноября, 03:00–03:59 UT; г — 4 ноября, 06:00–6:59 UT

Таблица 1

Рассчитанные значения Fe/O для 16 длительных событий в 7 участках энергетического спектра ионов

№	Периоды возмущенной стадии потоков длительных событий	Fe/O						
		0.06 МэВ/н	0.23 МэВ/н	1.18 МэВ/н	5.30 МэВ/н	13.00 МэВ/н	30.90 МэВ/н	75.69 МэВ/н
1	12:00.20.04–04:00.23.04.1998 г.	0.336	0.308	0.781	0.211	0.026	0.012	0.064
2	12:00.30.09–07:00.02.10.1998 г.	0.489	0.218	0.104	0.216	0.209	0.198	0.267
3	06:00.14.11–06:00.15.11.1998 г.	—	—	—	0.605	0.550	0.679	0.723
4	23:00.08.11–06:00.10.11.2000 г.	0.333	0.325	0.285	0.220	0.089	0.007	0.005
5	06:00.24.11–09:00.26.11.2000 г.	0.457	0.263	0.196	0.185	0.156	0.137	0.229
6	22:00.02.04–14:00.04.04.2001 г.	0.397	0.209	0.320	0.370	0.287	0.255	0.254
7	08:00.10.04–13:00.11.04.2001 г.	0.491	0.384	0.109	0.190	0.161	0.113	0.077
8	01:00.16.08–09:00.17.08.2001 г.	0.538	0.197	0.192	0.211	0.127	0.086	0.129
9	11:00.24.09–11:00.27.09.2001 г.	0.503	0.443	0.155	0.125	0.051	0.015	0.006
10	13:00.01.10–11:00.03.10.2001 г.	0.385	0.196	0.069	0.068	0.013	0.023	0.250
11	21:00.22.11–08:00.24.11.2001 г.	0.538	0.332	0.265	0.100	0.063	0.031	0.069
12	00:00.21.04–21:00.22.04.2002 г.	0.853	0.656	0.420	0.135	0.059	0.017	0.037
13	21:00.04.11–23:00.07.11.2003 г.	0.747	1.286	0.221	0.074	0.033	0.037	0.178
14	18:00.07.11–15:00.09.11.2004 г.	0.278	0.144	0.167	0.082	0.045	0.042	0.127
15	20:00.07.09–00:00.13.09.2005 г.	0.338	0.292	0.101	0.061	0.042	0.048	0.063
16	18:00.21.04–21:00.22.04.2002 г.	0.251	0.143	0.164	0.089	0.087	0.084	0.065
	Среднее	0.463± 0.043	0.360± 0.074	0.237± 0.046	0.184± 0.035	0.125± 0.034	0.111± 0.042	0.159± 0.044
	Медианные значения	0.457	0.292	0.192	0.160	0.075	0.045	0.102

поведением интенсивности протонов. Сопоставление профилей ионов O и Fe (рис. 1, б) показывает, что значения Fe/O > 1 наблюдаются в области малых энергий в течение большей части возмущенной стадии потока. После ее окончания и перехода к спокойной фазе интенсивности частиц низких энергий резким скачком принимают типичные значения. На временной оси стрелками показаны границы возмущенной стадии потока. Подобные изменения временных профилей наблюдаются в потоках частиц и для остальных рассмотренных длительных мощных SEP-событий (Solar energetic particle events).

2.2. Поведение Fe/O в потоках частиц от мощных длительных вспышек

На сайте [<http://www.srl.caltech.edu/sampex/Data-Center/DATA/EventSpectra/>] приведен список событий

23 цикла “The Top 30 SEP Events of Solar Cycle 23”. Для 16 мощных длительных событий, входящих в этот список (табл. 1), были получены значения Fe/O, рассчитанные с помощью энергетических спектров ионов O и Fe в семи интервалах энергий в течение возмущенной стадии развития вспыхивающих потоков частиц (рис. 3).

Для сопоставления с типичными случаями отдельно были рассмотрены 16 длительных событий GLE — всплеск солнечных космических лучей 23-го цикла активности (1997–2006).

В этих событиях возрастания релятивистских протонов регистрируются на наземных станциях сетью нейтронных мониторов. При определении значений Fe/O использовалось также отношение энергетических спектров этих элементов, построенных для возмущенной стадии развития вспыхивающих потоков. Ход значений Fe/O для потоков GLE и типичных

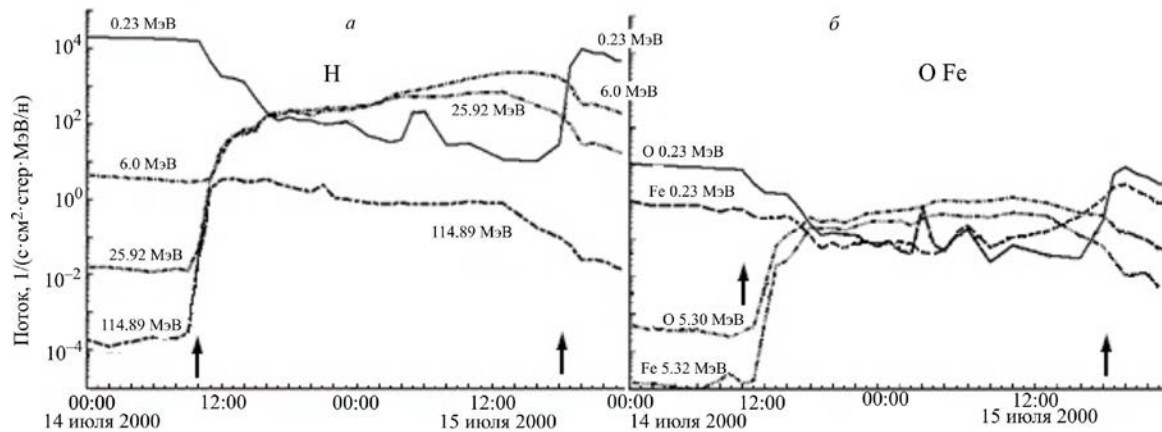


Рис. 2. Временные профили потоков протонов (а), ионов О и Fe (б) в период возмущенной стадии развития события 14 июля 2000 г.

Таблица 2

Рассчитанные значения Fe/O для 16 вспышек солнечных космических лучей
в 7 участках энергетического спектра ионов

№	Периоды возмущенной стадии потоков GLE	Fe/O						
		0.06 МэВ/н	0.23 МэВ/н	1.81 МэВ/н	5.30 МэВ/н	13.00 МэВ/н	30.90 МэВ/н	75.69 МэВ/н
1	12:00.06.11–02:00.07.11.1997	—	—	0.692	0.604	0.724	0.903	0.897
2	14:00.02.05–22:00.02.05.1998	0.928	0.759	1.010	0.903	0.685	0.551	0.662
3	08:00.06.05–21:00.06.05.1998	0.811	1.554	1.095	0.773	0.552	0.437	0.322
4	23:00.24.08–17:00.25.08.1998	0.443	0.245	0.121	0.079	0.054	0.235	0.584
5	10:00.14.07–18:00.15.07.2000	0.516	0.387	1.930	0.429	0.149	0.070	0.199
6	14:00.15.04–14:00.16.04.2001	2.891	1.891	0.964	0.459	0.459	0.722	0.972
7	02:00.18.04–19:00.18.04.2001	0.660	0.348	0.170	0.274	0.158	0.268	0.751
8	17:00.04.11–08:00.06.11.2001	0.540	0.257	0.229	0.285	0.095	0.045	0.102
9	05:00.26.12–10:00.27.12.2001	2.281	1.158	0.352	0.267	0.303	0.531	0.878
10	01:00.24.08–22:00.24.08.2002	0.761	0.789	0.480	0.191	0.144	0.486	0.925
11	11:00.28.10–09:00.29.10.2003	0.851	0.522	0.539	0.454	0.083	0.011	0.025
12	21:00.29.10–21:00.30.10.2003	1.147	0.689	0.616	0.345	0.158	0.113	0.216
13	17:00.02.11–06:00.04.11.2003	0.270	0.500	0.301	0.078	0.036	0.051	0.195
14	10:00.17.01–08:00.18.01.2005	0.743	0.388	0.323	0.160	0.052	0.013	0.095
15	07:00.20.01–19:00.21.01.2005	0.283	0.283	0.130	0.199	0.206	0.197	0.224
16	03:00.13.12–03:00.14.12.2006	1.278	0.846	0.580	0.663	0.755	0.840	0.936
	Среднее	0.960± 0.188	0.708± 0.126	0.596± 0.118	0.385± 0.061	0.288± 0.065	0.342± 0.076	0.499± 0.089
	Медианные значения	0.761	0.522	0.510	0.315	0.158	0.252	0.458

пичных длительных событий показывает как количественные, так и качественные отличия (рис. 3). Например, значения Fe/O для GLE уменьшаются с ростом энергий до 10.7–15.8 МэВ/н, а затем следует их заметное увеличение, чего не наблюдается при длительных событиях. Это указывает на возможную принадлежность событий GLE к отдельному подклассу длительных событий.

Наиболее характерные отличия в поведении средних значений Fe/O для GLE и мощных длительных событий были выявлены в интервалах энергий со средними значениями 13.0 и 75.69 МэВ/н. Было выполнено сопоставление значений Fe/O для каждого из рассмотренных событий в интервалах энергий 10.7–15 МэВ/н и 63.8–89.9 МэВ/н и оказалось, что у большинства длительных событий отношение Fe/O при изменении энергии остается практически постоянным. Остальные явления демонстрируют как уве-

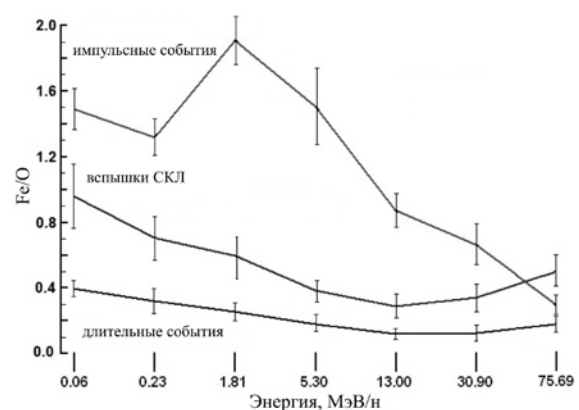


Рис. 3. Поведение отношения Fe/O во вспышечных потоках частиц для 37 импульсных событий, 16 вспышек СКЛ (GLE) и 16 длительных событий (gradual events). Вертикальными отрезками показаны ошибки измерений

личение, так и уменьшение Fe/O. Около 88 % GLE показывают более высокие значения Fe/O, причем в половине GLE Fe/O имеют повышенные значения от 0.58 до 0.97 при энергии 75.69 МэВ/н. Эти отличительные особенности поведения отношения Fe/O во вспышечных потоках GLE подтверждают их возможную принадлежность к отдельному подклассу длительных событий [Минасянц и др., 2016].

2.3. Поведение отношения Fe/O в потоках частиц от импульсных вспышек

Из всего списка импульсных событий [Nitta et al., 2006], для последующего анализа было выбрано 37 вспышек с рентгеновскими баллами, превышающими C1, в потоках частиц которых отношение $Fe/O > 0.5$ при энергиях 2–3 МэВ/н. По-видимому, происхождение потоков частиц от этих импульсных событий связано с действием механизма ускорения частиц непосредственно в области выделения энергии вспышек. Это можно объяснить тем, что в составе KBM, сопровождавших импульсные вспышки, отсутствовали как KBM с гало, так и фронты ударных волн при наблюдениях вблизи Земли. Таким образом, с учетом возможности ускорения ударными волнами эти выбросы являлись недостаточно эффективными. В табл. 3 представлены значения Fe/O для 37 импульсных событий в 7 участках энергетического спектра. Сравнение отношения Fe/O для импульсных и мощных длительных событий в тех же участках энергий ионов показано на рис. 3. Необходимо подчеркнуть, что изменение отношения Fe/O указывает на то, что использование единственного интервала энергий оказывается не вполне корректным при сравнении потоков частиц от вспышечных событий различных классов. Несмотря на вариации характеристик потоков частиц, от вспышки к вспышке существует систематический тренд значений Fe/O в зависимости от энергий ионов. В то же время обработка энергетических спектров при интегрировании по всему периоду времени существования вспышечного потока приводит к заметному понижению значений Fe/O, особенно в области небольших энергий ионов < 2 МэВ/н.

2.4. Обсуждение и анализ поведения отношения Fe/O в потоках частиц от вспышек различных классов

Перейдем теперь к анализу результатов с целью получения качественного объяснения поведения Fe/O в длительных и импульсных событиях, показанных на рис. 3 [Минасянц и др., 2016].

Классификация вспышек, доработанная и детализированная в настоящее время, впервые была предложена в [Pallavicini et al., 1977]. Согласно ей, импульсные вспышки происходят в небольших, высотой < 10 Мм, компактных магнитных петлях, заполненных горячей плазмой с плотностью энергии до $\sim 10^3$ эрг/см³, и часто порождают узкие выбросы плазмы.

Длительные вспышечные события развиваются в протяженных диффузных петельных корональных

структурах высотой > 50 Мм с существенно меньшей плотностью энергии в объеме вспышки $< 10^2$ эрг/см³. Выделение энергии во время вспышек наблюдается в вершинах петель. Длительные вспышки тесно связаны с активизацией и эрупцией волокон — протуберанцев, которые существуют в сложных магнитных структурах. Эти вспышки порождают обширные высокоэнергичные KBM. Подробный обзор сравнительных характеристик импульсных и длительных вспышек представлен в обзоре [Kallenrode, 2003] (см. также [Cliver et al., 2009]). Показано, что импульсные вспышки возникают в областях солнечной атмосферы с сильным магнитным полем и в относительно небольших объемах. Длительные события происходят в сложных протяженных корональных структурах с более слабым магнитным полем и занимают значительно больший объем короны.

В работе [Wang et al., 2006] подробно исследованы характеристики и локализации солнечных источников 25 импульсных вспышек, обогащенных ³He, в период с 1997 по 2003 г. (упрощенная схема магнитной топологии импульсной вспышки показана на рис. 4, а [Kallenrode, 2003]). Было установлено, что источники импульсных явлений располагаются вблизи границ КД с направленными к Земле линиями открытого магнитного поля. Среднее расстояние между источником ускоренных частиц и КД, усредненное по всем событиям, составило около 4° в фотосфере. Источник обычно представлял собой небольшую вспышечно-активную область в зоне долгот W25–W72. Отметим, что на наличие многочисленных небольших и быстро эволюционирующих активных областей, расположенных на границе обширной КД, наблюдавшейся со станции Skylab, указывалось в работе [Касинский, Томозов, 1974]. Кроме того, в работе [Wang et al., 2006] было обнаружено, что в пределах оцененного интервала времени инъекции быстрых частиц на изображениях источников в крайней ультрафиолетовой области спектра (КУФ) часто наблюдались рекуррентные плазменные выбросы вдоль линий открытого магнитного поля. В некоторых относительно редких случаях соответствующие выбросы вещества прослеживались в белом

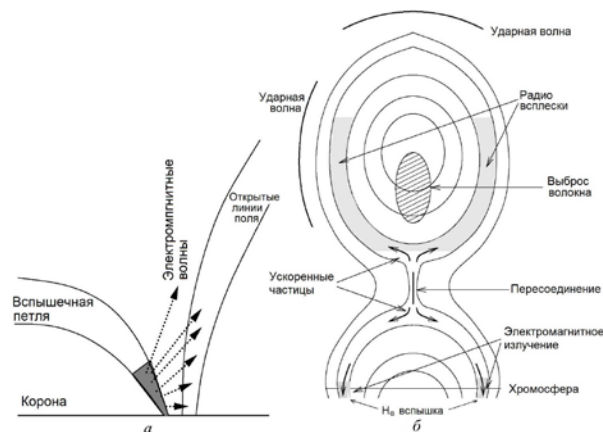


Рис. 4. Магнитные структуры и зоны ускорения частиц, порождающие импульсные (а) и длительные (б) вспышечные потоки ионов Kallenrode [2003] и Cliver et al. [2009])

Таблица 3

Рассчитанные значения Fe/O для 37 импульсных событий в семи участках энергетического спектра ионов

№	Периоды развития потоков импульсных событий	Fe/O						
		0.06 МэВ/н	0.23 МэВ/н	1.81 МэВ/н	5.30 МэВ/н	13.00 МэВ/н	30.90 МэВ/н	75.69 МэВ/н
1	03:00.15.08–02:00.17.08.1998 г.	0.989	1.153	1.298	0.267	0.033	0.048	0.074
2	11:00.27.09–02:00.28.09.1998 г.	1.253	1.187	1.034	1.243	0.599	0.118	0.215
3	01:00.28.09–03:00.29.09.1998 г.	1.553	1.501	1.229	1.611	0.790	0.123	0.109
4	07:00.29.09–00:00.30.09.1998 г.	1.710	1.503	1.397	1.016	0.385	0.125	0.181
5	06:00.20.02–16:00.20.02.1999 г.	0.324	0.362	2.450	6.293	–	0.248	–
6	17:00.20.02–10:00.21.02.1999 г.	0.465	1.076	3.807	2.481	1.069	0.328	0.081
7	13:00.21.02–06:00.22.02.1999 г.	0.684	1.227	3.575	–	–	0.183	0.073
8	02:00.11.03–16:00.12.03.1999 г.	0.784	0.689	1.318	0.530	0.276	0.516	0.107
9	13:00.20.07–10:00.21.07.1999 г.	1.054	1.566	1.344	0.216	0.541	0.141	0.092
10	07:00.27.12–05:00.29.12.1999 г.	1.384	2.216	3.953	1.342	0.619	0.112	0.207
11	11:00.07.03–14:00.07.03.2000 г.	1.967	1.801	1.042	2.007	1.824	0.741	0.178
12	15:00.07.03–02:00.08.03.2000 г.	1.895	2.882	2.006	2.158	2.052	0.981	0.163
13	03:00.08.03–18:00.08.03.2000 г.	3.012	2.559	1.033	1.625	1.245	0.595	0.062
14	23:00.18.03–14:00.19.03.2000 г.	1.153	0.418	1.986	2.043	–	–	0.152
15	04:00.23.04–10:00.24.04.2000 г.	0.433	0.254	1.979	0.405	0.567	0.365	0.072
16	22:00.24.04–16:00.25.04.2000 г.	2.630	2.312	0.956	0.305	0.231	0.279	0.213
17	11:00.01.05–08:00.02.05.2000 г.	1.543	1.922	1.324	2.020	0.876	0.510	0.426
18	14:00.04.05–02:00.06.05.2000 г.	0.840	1.157	2.238	1.483	0.937	0.122	0.219
19	01:00.24.05–00:00.25.05.2000 г.	1.405	1.130	1.417	1.412	0.735	0.420	0.546
20	03:00.22.08–18:00.22.08.2000 г.	2.849	0.641	1.701	0.254	–	–	–
21	19:00.22.08–23:00.22.08.2000 г.	1.030	2.308	1.008	1.370	–	–	–
22	08:00.27.09–22:00.28.09.2000 г.	1.584	0.589	1.005	1.009	1.110	0.961	0.108
23	08:00.29.09–15:00.30.09.2000 г.	1.232	0.840	1.238	0.476	0.535	0.399	0.126
24	18:00.14.04–13:00.15.04.2001 г.	1.800	1.624	1.622	1.558	1.432	0.535	0.180
25	12:00.08.09–16:00.10.09.2001 г.	1.830	0.856	1.273	0.472	0.375	0.722	0.460
26	14:00.11.09–23:00.12.09.2001 г.	2.834	2.038	1.948	1.761	1.022	1.018	0.246
27	10:00.22.09–23:00.22.09.2001 г.	2.504	1.168	1.253	0.759	–	–	0.222
28	16:00.25.02–19:00.26.02.2002 г.	1.046	1.098	1.676	0.654	0.655	0.598	0.221
29	14:00.14.04–23:00.14.04.2002 г.	1.864	1.814	3.620	6.419	0.339	0.748	0.182
30	00:00.15.04–04:00.15.04.2002 г.	1.395	1.247	2.512	0.600	0.667	1.214	0.746
31	05:00.15.04–03:00.16.04.2002 г.	1.372	1.520	2.158	1.151	0.116	0.089	0.038
32	23:00.03.08–15:00.04.08.2002 г.	2.357	1.521	2.028	1.348	0.954	0.494	0.183
33	16:00.04.08–04:00.06.08.2002 г.	2.333	0.871	2.366	1.418	1.523	3.294	0.887
34	11:00.19.08–22:00.19.08.2002 г.	0.702	0.380	1.581	1.636	1.857	1.863	0.981
35	23:00.19.08–10:00.20.08.2002 г.	1.056	0.746	2.577	2.520	1.829	1.746	1.046
36	11:00.20.08–03:00.22.08.2002 г.	1.359	1.297	3.494	2.115	1.733	1.485	1.029
37	15:00.12.12–02:00.13.12.2002 г.	0.896	1.207	2.418	0.377	0.204	0.693	0.466
	Среднее	1.490± 0.116	1.316± 0.105	1.910± 0.139	1.510± 0.228	0.875± 0.102	0.661± 0.116	0.303± 0.057
	Медианные значения	1.384	1.207	1.676	1.359	0.735	0.510	0.183

свете вплоть до больших гелиоцентрических расстояний. Важно подчеркнуть, что динамика этих выбросов отражается на временных вариациях интенсивностей ионов ^3He и Fe, измеренных с ИСЗ ACE/ULEIS в области энергий 0.32–0.45 МэВ. Иногда продолжениями этих выбросов, зарегистрированных на ИСЗ SOHO/EIT, были KBM, наблюдавшиеся на коронографе LASCO-C2 (поле зрения $\sim(2\div6)R_{\odot}$), которые были узкими $\sim 30^\circ$ и быстрыми со скоростями от 500 до 1000 км/с [Wang et al., 2006].

В той же работе [Wang et al., 2006] авторы пришли к заключению, что импульсные всплывающие

потоки частиц возникают вблизи поверхности раздела между активными областями и соседними КД и являются результатом обменного пересоединения между областями замкнутого и открытого магнитных полей, при котором плазма и ускоренные частицы передаются от замкнутых к открытым линиям поля и выходят в гелиосферу в сопровождении узких коллимированных выбросов плазмы. В этом сценарии ускорение частиц и фракционирование элементов происходят в области пересоединения при повышенных значениях отношений $^3\text{He}/^4\text{He}$ и Fe/O. Обогащение области магнитного пересоединения ионами тяжелых элементов в ходе вспышки может произойти и

в результате сильного «испарения» хромосферы, когда потоки ускоренных энергичных электронов проникают вниз в хромосферу, локально нагревают ее до высоких температур и вызывают быстрый подъем горячей плазмы. В этих условиях энергичные электроны с нетепловой функцией распределения будут «вытягивать» за собой часть более холодных ионов, приводя к их ускорению до энергий 1–10 МэВ [Мордвинов и др., 1985]. Для объяснения сильного возрастания отношения изотопов $^3\text{He}/^4\text{He}$ в импульсных вспышках (а также тяжелых ионов от О до Fe) был предложен механизм селективного ускорения, связанный с возбуждением электромагнитных ионно-циклотронных волн потоками энергичных электронов [Roth, Temerin, 1998].

В работе [Nitta et al., 2006], также посвященной поиску источников импульсных событий на Солнце и выявлению их магнитных связей с Землей, сделана попытка определения области источников 117 явлений вспыхивающих энергичных частиц регистрации ионов в диапазоне энергий 2–3 МэВ/н. С этой целью были использованы также сведения о радиовсплесках III типа, которые возникали в пределах 5-часового интервала, предшествующего появлениям потоков ионов. Таким способом были определены солнечные источники 69 явлений из 117. Кроме того, на КУФ-изображениях полного диска Солнца были выявлены выбросы в области источника вскоре после всплеска III типа. Однако определение магнитной связи с Землей оказалось непростой задачей, и только в 40 % случаев линии поля, близкие к области источника в фотосфере, оказались вблизи координат спирали Паркера на поверхности источника. Следует подчеркнуть, что в 80 % областей источников вблизи них также были обнаружены структуры с открытым магнитным полем [Nitta et al., 2006].

Отсюда можно сделать предварительный вывод, что пик Fe/O на графике зависимости от энергии (рис. 3) обусловлен ионами Fe, ускоренными в области импульсной вспышки. Принципиально важным является наличие магнитных структур с открытыми линиями поля, выходящими в межпланетную среду (например КД) по соседству со вспыхивающими областями (рис. 4, а). Процессом, обеспечивающим ускорение ионов и их выход в межпланетную среду, является обменное пересоединение магнитных полей на границе раздела замкнутых и открытых магнитных полей в хромосфере активных областей. В центральных частях активных областей могут накапливаться ионы Fe с низким FIP, подверженные действию пондеромоторной силы альвеновских волн [Laming, 2004].

Длительные вспыхивающие события с ускорением частиц ударными волнами происходят в сложных магнитных структурах (рис. 4, б), содержащих волокно магнитного потока над линией раздела полярностей поля в фотосфере. При нарушении общего равновесия магнитной конфигурации поля волокно теряет устойчивость и начинает ускоренно подниматься вверх, что вызывает пересоединение магнитного поля в нижней его части и инициирует появление вспыхивающего процесса (рис. 4, б). Формирующийся KBM (волокно находится в его центральной части) в

своем развитии обычно проходит три фазы: начальную до включения вспышки; фазу быстрого ускорения, совпадающую с фазой роста эмиссии вспышки, и фазу распространения с постоянной или медленно спадающей скоростью [Zhang et al., 2001]. В ходе распространения KBM в короне и межпланетной среде его структура расширяется и заполняет значительную долю гелиосферы. Естественно, что детали эволюции KBM определяются магнитной структурой поля в начальной конфигурации, где произошла вспышка.

По современным представлениям вспышка и KBM рассматриваются как единый процесс нарушения равновесия магнитной структуры. Самые высокоскоростные KBM могут возбуждать ударные волны в короне и межпланетной среде, которые способны эффективно ускорять частицы (ширина KBM в таких событиях превосходит 100°). Некоторым указанием на возбуждение ударных волн в солнечной короне может служить появление радиовсплесков II типа в метровом диапазоне [Reames, 2013]. Состав элементов, ускоряемых ударными волнами в длительных событиях, преимущественно отражает содержание корональных ионов начиная с высот в $(2\div 3)R_\odot$, которые уже подвержены действию FIP-эффекта [Reames, 2013]. Относительная важность механизмов ускорения ударными волнами KBM зависит от угла между нормалью к фронту волны и магнитным полем; наиболее эффективное ускорение ионов с энергиями ~МэВ осуществляется вблизи «носовой» части KBM [Kallenrode, 2003]. Добавим, что авторы работы [Cliver et al., 2009] отметили возможность образования ударной волны в солнечной короне при быстром боковом расширении структуры KBM в ходе его подъема в короне с возможным ускорением протонов до энергии ~30 МэВ (рис. 4, б).

В магнитной конфигурации на рис. 4, б частицы, ускоренные в области пересоединения ниже KBM, проникают в плотную солнечную атмосферу, вызывая электромагнитное излучение и порождая вспыхивающее явление в оптическом и рентгеновском диапазонах. Динамика KBM вблизи Солнца является существенным фактором, отвечающим за интенсивность потоков протонов с энергией ~10 МэВ/н, поскольку в фазе раннего подъема KBM «запускает» вспышку в рентгеновском диапазоне и порождает корональную волну, которая инициирует ускорение протонов из области вспышки [Torsti et al., 2001]. Часть ускоренных частиц удерживается в зоне за распространяющимся KBM и образует так называемый резервуар (магнитную бутылку) — обширную расширяющуюся область плазмы в межпланетной среде с энергичными частицами и турбулентными альвеновскими волнами [Reames, 2013]. Процесс возникновения и дальнейшей эволюции расширяющегося магнитного резервуара, заполненного энергичными частицами, может регистрироваться как длительное событие СКЛ в гелиосфере. Нужно заметить, что в длительных явлениях (рис. 4, б) небольшая часть ускоренных вспышкой частиц может проникнуть в область KBM и дополнительно ускориться ударной волной — тогда спектры

ускоренных частиц будут носить смешанный характер. В этой связи особую роль играет величина $Fe/O > 1$, что является следствием FIP-эффекта, поскольку популяция частиц, ускоренных вспышкой, сильно обогащена Fe. Ускоренные ударными волнами КВМ частицы потока, напротив, обеднены Fe ($Fe/O < 1$).

Еще одно интересное свойство обнаружено в поведении энергетических спектров ионов (He, C, O, Fe) в потоках частиц от длительных вспышек. Используя данные об интегральных потоках протонов с КА GOES, было установлено, что в периоды усиленных потоков ($F_p > 10^2$ $1/(c \cdot cm^2 \cdot ster)$) высокоэнергичных протонов с энергиями, превышающими 60 МэВ, наблюдаются резкие изменения спектров энергий ионов в виде скачков интенсивности частиц в интервале 1.5–2.5 МэВ/н [Минасянц и др., 2016a]. Это характерно лишь для очень мощных вспыхивающих событий рентгеновского балла X, сопровождаемых высокоскоростными КВМ. В 1997–2007 гг. было зарегистрировано всего десять таких событий, причем 9 относились к GLE и лишь одно — к классу типичных длительных событий. Интервалы времени с такими усиленными потоками протонов относятся к различным стадиям вспыхивающего развития: начальный подъем, максимум и период спустя сутки с приходом к орбите Земли КВМ, сопровождавшего процесс возникновения и развития вспышки. Зарегистрировано три события, когда дополнительное усиление интенсивности высокоэнергичных протонов оказалось связанным с влиянием фронта ударной волны от КВМ. Таким образом, природа образования скачков интенсивности в спектрах связана как с непосредственно ускоренными во вспышках высокоэнергичными потоками частиц, так и с дополнительным влиянием высокоскоростных ударных фронтов КВМ. На рис. 5 показаны энергетические спектры ионов Fe и O с резкими скачками интенсивности потоков для трех различных событий.

Интервалы времени при построении спектров энергий (рис. 5, а, в) связаны с периодом прихода фронта ударной волны КВМ (события GLE). Показаны моменты прихода ударного фронта, на панели б — длительное вспыхивающее событие.

В энергетических спектрах ионов в разных событиях наблюдаются скачки интенсивности от одного часа и практически до одних суток. Амплитуда скачков связана с интенсивными потоками высокоэнергичных протонов. При значениях потоков $F_p < 10^2$ $1/(c \cdot cm^2 \cdot ster)$ для протонов с энергиями $E_k > 60$ МэВ скачки интенсивности в энергетических спектрах отсутствуют. Все интервалы времени, на которых наблюдались такие скачки, относятся к возмущенной стадии развития вспыхивающих потоков.

Характерным отличием энергетических спектров примесных ионов со скачками интенсивности является заметное обогащение ионами Fe относительно O в интервале энергий 0.06–1.5 МэВ/н, что приводит к значениям $Fe/O \geq 1$. Влияние FIP-эффекта в потоке ускоренных высокоэнергичных вспыхивающих частиц и их дополнительном ускорении ударными волнами КВМ для каждого события обладает определенными отличиями, но вместе с тем сохраняется общая тен-

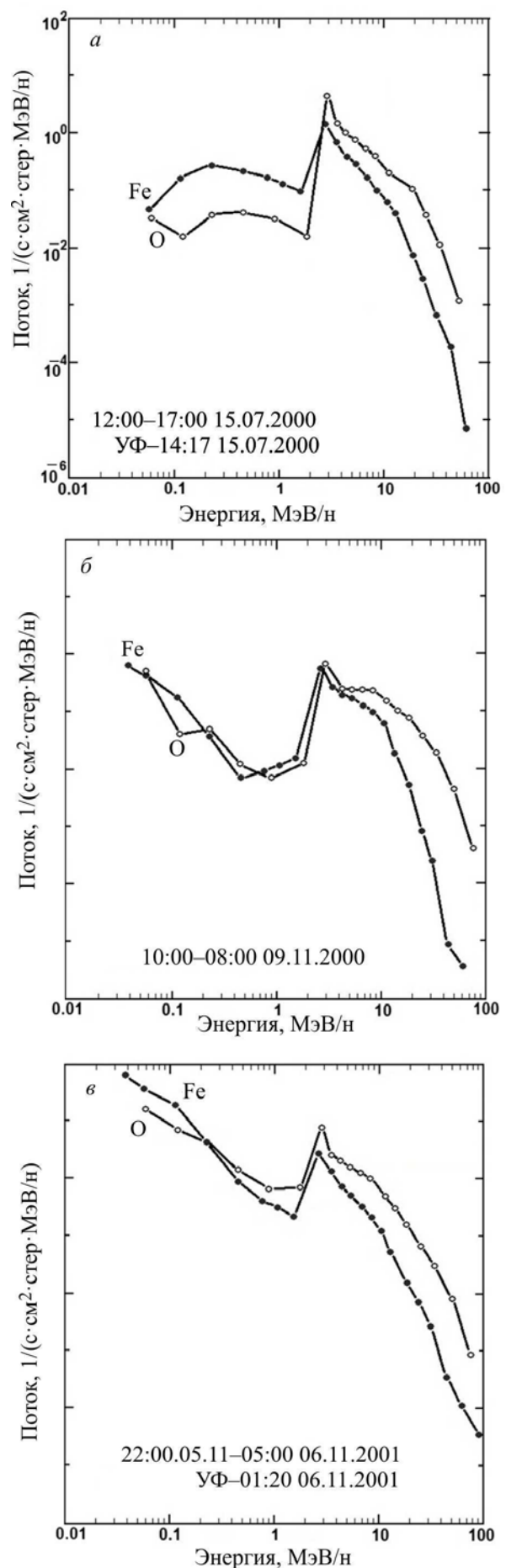


Рис. 5. Скачки интенсивности потоков в энергетических спектрах ионов Fe и O в интервале 1.5–2.5 МэВ/н

денция. Как правило, отличительным свойством GLE является присутствие указанных скачков интенсивности в энергетических спектрах ионов. Существование повышенных значений Fe/O в периоды таких скачков приводит к тому, что в GLE по отношению к мощным длительным явлениям наблюдаются более высокие значения Fe/O в интервале энергий ионов 0.06–1.5 МэВ/н.

2.5. Обсуждение результатов

Возмущенная активная стадия вспышечных потоков является наиболее информативной при исследовании свойств ускоренных частиц и их изменений при движении потоков частиц в межпланетном пространстве. Энергетические спектры с временем интегрирования 1 ч позволяют проследить свойства потоков частиц различных энергий и установить границу возмущенной части вспышечного потока, после которой потоки частиц плавно убывают до фоновых значений. Обработка энергетических спектров при интегрировании по всему вспышечному потоку приводит к существенному занижению значений Fe/O, особенно для малой энергии ионов < 2 МэВ/н.

В энергетических спектрах ионов в период возмущенной стадии обнаружены резкие скачки интенсивности потоков в интервале 1.5–2.5 МэВ/н. Источниками этого явления следует считать, по-видимому, присутствие высокоэнергичных потоков протонов $E_k > 60$ МэВ с интенсивностью $F_p > 10^2$ 1/(с·см²·стер).

Из представленных на рис. 3 распределений Fe/O в длительных и импульсных событиях, а также из анализа существующих модельных представлений о природе импульсных и длительных явлений можно сделать следующие выводы.

Наиболее отчетливо влияние FIP-эффекта (максимальные значения отношения Fe/O) проявляется в импульсных вспышечных событиях для ионов с энергиями < 2 МэВ/н (рис. 3). Это может быть связано с первоначальным накоплением в активных областях элементов с низким FIP (например Fe) с последующим их освобождением в результате обменного пересоединения с линиями открытого поля соседних КД и выходом энергичных частиц непосредственно в межпланетную среду [Wang et al., 2006]. В области энергетических спектров ионов с более высокими энергиями проявление FIP-эффекта ослабевает и Fe/O быстро уменьшается. Максимум Fe/O в области энергий 0.2–5 МэВ/н (рис. 3) может быть обусловлен ускорением ионов в плазменных выбросах, направленных вдоль линий открытого поля из области магнитного пересоединения вспышки. Высокая эффективность ускорения как электронов, так и ионов при моделировании процесса магнитного пересоединения в токовых слоях была подтверждена лабораторными экспериментами на плазменных установках [Томозов, Строкин, 2015].

В длительных событиях Fe/O плавно спадает с энергией ионов с небольшим подъемом в области высоких энергий > 30 МэВ/н (рис. 3), а наибольшие значения Fe/O достигаются в области сравнительно небольших энергий. В таких событиях роль ускорения частиц ударными волнами от КВМ, по-видимому, может быть определяющей, поскольку ударные волны могут возникать и в короне при ускорен-

ном расширении КВМ на фазе его подъема (рис. 4, б) [Cliver et al., 2009]. Как и в предыдущей работе [Минасянц и др., 20166], отметим, что поведение Fe/O в спектрах вспышечных потоков в межпланетной среде объясняется особенностями рассеяния ионов Fe и O из-за их взаимодействия с альвеновскими волнами, которые генерируются энергичными протонами, ускоренными ударными волнами от КВМ, что вполне согласуется с выводами [Reames, 2014]. Эти выводы подтверждаются также обнаруженной высокой корреляцией между потоком протонов в диапазоне энергий 5–200 МэВ и скоростью КВМ. Корреляция высока также в области сравнительно небольших энергий < 20 МэВ [Dierckxsens et al., 2015].

При сопоставлении значений Fe/O, полученных для возмущенной стадии потоков частиц в 16 GLE и 16 мощных длительных событиях в тех же интервалах энергий, были выявлены заметные различия в значениях и поведении Fe/O в зависимости от энергии. Это указывает на возможность выделения GLE в отдельный подкласс в общем классе длительных событий.

Подчеркнем, что, поскольку FIP-эффект непосредственно проявляется в составе энергичных частиц, ускоренных как вспышками, так и связанными с ними КВМ, он может играть существенную диагностическую роль при возникновении и развитии процессов солнечной активности.

3. ПОВЕДЕНИЕ Fe/O В КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСАХ МАССЫ

3.1. Изменение отношения Fe/O с энергией ионов в структурах магнитных облаков при развитии мощных геомагнитных бурь

В ходе эволюции в активных областях Солнца постоянно возрастает свободная магнитная энергия, что при появлении областей диссипации (токовых слоев) приводит, как правило, к возникновению быстротекущих процессов выделения энергии — солнечных вспышек и КВМ. В области энерговыделения вспышки (токовым слое) происходит интенсивный нагрев плазмы и ускорение частиц до высоких энергий. Кроме того, мощные солнечные вспышки почти всегда сопровождаются быстрыми КВМ с образованием ударных волн, на фронтах которых эффективно ускоряются частицы при движении вспышечных потоков плазмы вблизи Солнца и в межпланетной среде.

При распространении КВМ в короне и межпланетной среде его магнитная структура расширяется вслед за идущей впереди ударной волной. В количественном отношении около половины всех КВМ, обладающих некоторыми определенными характеристиками, представляют магнитные облака (МО). Непосредственные наблюдения МО с космических аппаратов в межпланетной среде показали, что такие структуры обладают магнитным полем, более сильным чем в окружающем СВ, пониженными значениями плотности N_p и температуры T_p протонов и, вследствие этого, преобладанием магнитного давления над газовым.

Самыми геоэффективными КВМ являются обладающие передним ударным фронтом высокоско-

ростные выбросы, которые относятся к наиболее достоверной зоне 4 (по классификации SOHO). В тех случаях, когда в структурный состав KBM входит МО, резко повышается вероятность возникновения магнитной бури при взаимодействии KBM с магнитосферой Земли.

Ранее было установлено, что МО при возникновении KBM в активной области на Солнце обладают ориентацией магнитного поля, близкой ориентации поля в группе пятен «родительской» активной области. Отмечалось, что ориентация магнитного поля в МО в основном сохраняется при их движении в межпланетном пространстве [Driel-Gesztelyi et al., 2009]. Указывалось также, что МО со сходной ориентацией поля проявляют себя различным образом при развитии геомагнитных возмущений во время равноденствий и солнцестояний [Бархатов и др., 2014].

Наблюдательные данные указывают на существование плавного вращения магнитного поля в МО. Известно, что когда в окрестности Земли появляется МО, повышается вероятность возникновения геомагнитной бури при взаимодействии KBM с магнитосферой Земли. МО создают сильные возмущения в СВ и благодаря присутствию в них южной B_z -компоненты межпланетного магнитного поля (ММП) обладают высокой геоэффективностью [Gosling et al., 1999; Gonzales et al., 1999; Ермолаев и др., 2009]. Между передним фронтом ударной волны KBM и телом МО располагается область турбулентного сжатия, или оболочка, для которой характерны сильные вариации компонент ММП, присутствие B_z -компоненты, а также повышенные значения плотности, скорости и температуры плазмы [Ермолаев и др., 2009]. На рис. 6 схематически показана структура KBM, включающая фронт ударной волны, область сжатия плазмы (оболочка) и МО [Richardson et al., 2010].

Проведенные ранее разными авторами исследования свойств МО и их роли в развитии геомагнитных бурь различной мощности привели к следующим выводам.

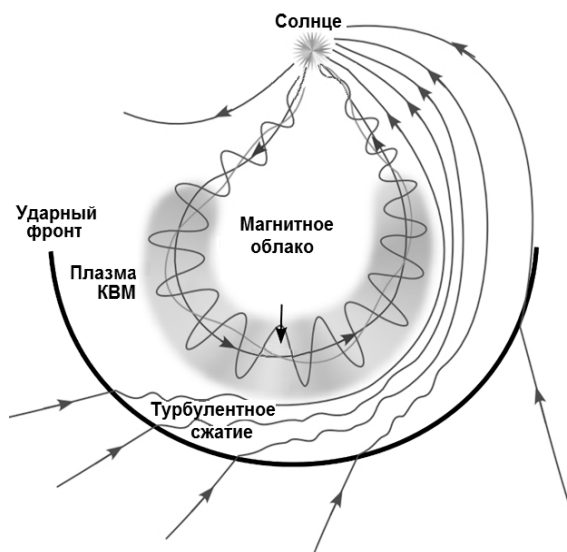


Рис. 6. Структура KBM

Обнаружено вращение вектора магнитного поля по спирали в конфигурации МО. Учет изменения ориентации магнитного поля МО относительно плоскости эклиптики в течение года позволяет улучшить качество прогноза интенсивности геомагнитных бурь [Бархатов и др., 2014]. Ударная волна и область турбулентного сжатия плазмы являются основными источниками возникновения геомагнитных возмущений, дальнейшее развитие которых обеспечивается плазмой МО [Barkhatov et al., 2015].

Количество KBM показывает хорошую корреляцию с числами Вольфа. В то же время количество МО в составе KBM антикоррелирует с ними. Значения параметров магнитного поля и плазмы в KBM, которые в межпланетной среде классифицируются как МО, заметно выше, чем в обычных KBM [Yutian Chi et al., 2015].

Основной целью дальнейших исследований было изучение поведения отношения Fe/O в отдельных структурах KBM при развитии геомагнитных бурь. Рассматривались 9 мощных геомагнитных бурь с $Dst_{min} < -200$ нТл, которые произошли в 1998–2005 гг. и были связаны с KBM, включающими фронты ударных волн (Shock 4), области сжатия и МО. По классификации ударных фронтов, используемой в наблюдениях на КА SOHO, Shock 4 относится к самому высокому классу и обладают наибольшими скачками физических параметров V , N_p , B , T на переднем ударном фронте KBM. Данные, описывающие временные границы каждой из структур KBM, были взяты в Wind ICME Catalogue [<https://wind.nasa.gov/fullcatalogue.php>].

Метод изучения физических условий для каждого события включает также сопоставление временных изменений 12 параметров СВ в структурах KBM вблизи орбиты Земли с временным разрешением 5 мин и часовых значений геомагнитного экваториального индекса Dst_{min} .

Отдельно для области сжатия плазмы и МО были построены энергетические спектры ионов Fe и O в семи энергетических интервалах. Средние значения в интервалах, так же как источники данных наблюдений и метод их обработки, были описаны во введении. При расчете энергетических спектров ионов учитывалось время прохождения каждой из структур KBM в потоках СВ. По значениям потоков Fe и O были рассчитаны их относительные содержания в семи интервалах энергий для структур KBM. В предыдущих работах авторов [Минасянц и др., 2016б, в] было показано, что Fe/O в различных интервалах энергий ионов является хорошим индикатором физического состояния исследуемой среды.

На рис. 7 даны распределения физических параметров в структуре KBM и ход развития магнитной бури по Dst -индексу для события 9–10 ноября 2004 г., а на рис. 8 показаны энергетические спектры ионов Fe и O в плазме KBM для этого же события.

Следует отметить, что при расчете энергетических спектров ионов в области сжатия учитывалось влияние переднего ударного фронта KBM. В табл. 4 и 5 приведены рассчитанные значения Fe/O для семи энергетических интервалов в области сжатия и МО в структуре девяти KBM при развитии мощных геомагнитных бурь с $Dst_{min} < -200$ нТл.

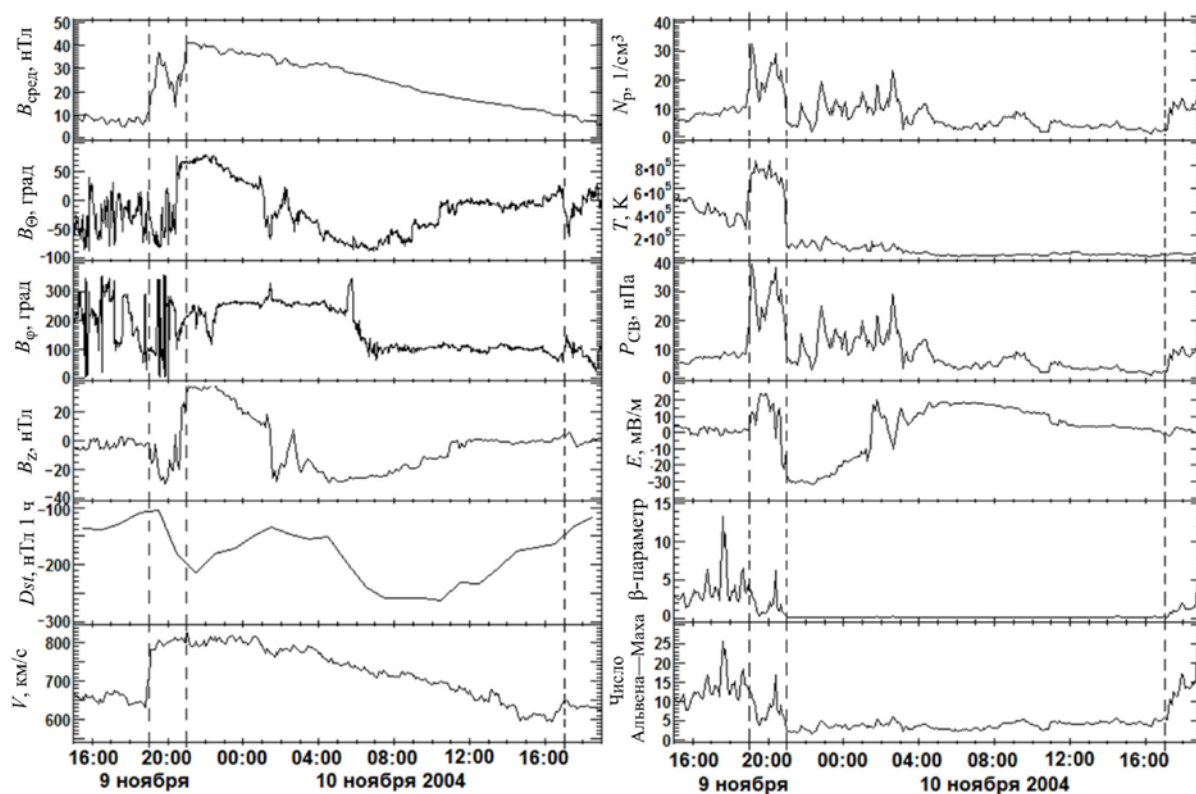


Рис. 7. Временной ход параметров плазмы солнечного ветра 9–10 ноября 2004 г. Вертикальными штриховыми линиями слева направо показаны: момент прихода фронта ударной волны КВМ (УФ), после которого следует область турбулентного сжатия плазмы (оболочка), между второй и третьей штриховыми линиями — МО

Таблица 4

Рассчитанные отношения Fe/O в области турбулентного сжатия (оболочки)
для 9 КВМ в 7 участках энергетического спектра ионов

Области турбулентного сжатия (оболочки)	Fe/O						
	0.06 МэВ/н	0.23 МэВ/н	1.81 МэВ/н	5.30 МэВ/н	13.00 МэВ/н	30.90 МэВ/н	75.69 МэВ/н
02:23.25.09–04:32.25.09.1998	0.468	0.194	0.134	0.107	0.078	–	–
14:23.15.07–21:04.15.07.2000	0.562	0.657	0.882	0.275	0.057	0.028	0.675
18:09.11.08–06:04.12.08.2000	0.566	0.189	0.071	0.002	0.166	0.870	0.415
05:51.24.11–15:46.24.11.2001	0.630	0.365	0.294	0.250	0.117	0.059	0.282
06:00.29.10–11:15.29.10. 2003	0.610	0.451	0.320	0.202	0.040	0.004	0.270
08:35.20.11–11:30.20.11. 2003	0.245	0.170	0.178	0.152	0.181	0.207	0.117
17:58.07.11–22:45.07.11. 2004	0.242	0.090	0.346	0.129	0.101	0.095	0.164
18:25.09.11–20:37.09.11. 2004	0.267	0.186	0.156	0.079	0.043	0.059	0.436
02:10.15.05–04:46.15.05. 2005	0.255	0.141	0.127	–	–	–	–
Среднее	0.427±0.057	0.273±0.061	0.279±0.082	0.149±0.032	0.140±0.036	0.189±0.116	0.337±0.072

Таблица 5

Рассчитанные значения отношения Fe/O в МО для 9 КВМ в 7 участках энергетического спектра ионов

Магнитное облако	Fe/O						
	0.06 МэВ/н	0.23 МэВ/н	1.81 МэВ/н	5.30 МэВ/н	13.00 МэВ/н	30.90 МэВ/н	75.69 МэВ/н
04:33.25.09–17:00.26.09. 1998	0.438	0.313	0.504	0.212	0.233	0.343	0.080
21:05.15.07–13:28.16.07. 2000	0.507	0.291	0.253	0.102	0.061	0.029	0.173
06:05.12.08–05:06.13.08. 2000	0.338	0.636	0.780	1.046	0.308	0.282	0.233
15:47.24.11–13:17.25.11. 2001	0.561	0.360	0.281	0.209	0.143	0.082	0.064
11:16.29.10–01:55.30.10. 2003	0.443	0.280	0.197	0.120	0.031	0.074	0.173
11:31.20.11–01:40.21.11. 2003	0.963	0.475	0.403	0.177	0.166	0.158	0.073
22:46.07.11–09:21.09.11. 2004	0.532	0.264	0.187	0.069	0.047	0.044	0.280
20:38.09.11–16:47.10.11. 2004	0.561	1.509	0.312	0.112	0.057	0.071	0.243
04:47.15.05–22:47.16.05. 2005	0.291	0.132	0.083	0.011	0.008	0.209	0.132
Среднее	0.515±0.064	0.473±0.138	0.333±0.069	0.229±0.104	0.117±0.034	0.144±0.037	0.161±0.027

Перейдем к анализу полученных результатов обработки данных (рис. 6–8 и табл. 4, 5), относящихся к поведению Fe/O в структурах МО.

Добавим, что отношение примесных элементов Fe/O (а также Mg/O и др.) является мерой проявления FIP-эффекта в солнечной атмосфере, суть которого была достаточно подробно описана во введении.

Вследствие этого отношение Fe/O в разных корональных структурах и в СВ может иметь разные значения и служить индикатором физических процессов в солнечной плазме (например, в корональной плазме среднее значение $(\text{Fe/O})_{\text{кор}}/(\text{Fe/O})_{\text{фот}} \sim 4$). По результатам анализа 54 событий SEP (ноябрь 1994 г. – июнь 2012 г.) в области энергий частиц 2–15 МэВ/н был сделан вывод [Reames, 2014], что основной причиной вариаций обилия тяжелых ионов в межпланетной среде (следовательно, и вариаций Fe/O) является их рассеяние. Оно происходит на альвеновских волнах и зависит от магнитной жесткости частиц. Этот процесс осуществляется при распространении частиц из области ускорения ударными волнами, вызванными КВМ. В межпланетной среде альвеновские волны возбуждаются энергичными протонами и ионами, которые ускоряются как вспышками, так и ударными волнами от КВМ [Reames, 2014]. Ионы Fe рассеиваются альвеновскими волнами менее эффективно, чем ионы O, поэтому при распространении в турбулентной среде ионы Fe могут опережать ионы O, что и приводит к значению $\text{Fe/O} > 1$.

Если области возникновения вспышки и зарождения КВМ являются пространственно близкими или связанными магнитным полем, часть частиц, ускоренных во вспышке, может захватываться КВМ и получать дополнительное ускорение в ударной волне при распространении в межпланетной среде [Томозов, 2012].

При анализе поведения Fe/O в структуре МО (рис. 8 а, б), вызвавшего геомагнитную бурю 9–10 ноября 2004 г. (рис. 7), можно отметить следующее. Во-первых, в области сжатия плазмы (рис. 8, а) позади ударной волны во всем диапазоне энергий ионов 0.01–100 МэВ/н $\text{Fe/O} < 1$, что свидетельствует о слабом влиянии альвеновской турбулентности на рассеяние ионов, в том числе ионов O с высоким FIP. Нужно подчеркнуть, что турбулентность альвеновских волн существует и позади ударной волны. Во-вторых, в зоне МО (рис. 8, б) отмечается лишь небольшая область с $\text{Fe/O} > 1$ в диапазоне энергий 0.2–0.6 МэВ/н, что может быть связано либо с влиянием рассеяния на альвеновских волнах, либо с эффектом преимущественного накопления ионов с низким FIP в магнитной структуре перед КВМ.

На рис. 9 приведены изменения средних значений Fe/O в семи интервалах энергий ионов для МО в структурах девяти выбросов КВМ, вызвавших мощные геомагнитные бури с $Dst_{\text{min}} < -200$ нТл. Для сравнения показано поведение Fe/O для GLE. Можно отметить (рис. 8), что во всем диапазоне энергий ионов $\text{Fe/O} < 1$ как в МО, так и в оболочке

после ударной волны. В то же время в оболочке наблюдается определенный максимум Fe/O для энергии 1.81 МэВ/н, подобный максимуму Fe/O в импульсных вспыхивающих явлениях при той же энергии. Заметим также, что в МО в диапазоне энергий 0.2–0.6 МэВ/н отмечается некоторый излом зависимости Fe/O, т. е. так же, как и в явлении 9–10 ноября 2004 г., $\text{Fe/O} > 1$ (рис. 8, б).

Отдельно были выявлены структуры МО, не имевших передних ударных фронтов (т. е. без областей турбулентного сжатия перед МО) и вызвавших лишь непродолжительные геомагнитные бури умеренной мощности с $Dst_{\text{min}} > -50$ нТл. Усредненная кривая изменения Fe/O, построенная по спектрам энергий ионов O и Fe для четырех МО с указанными свойствами, показана также на рис. 9. Отличительным свойством этой кривой являются довольно низкие значения Fe/O по сравнению с геоэффективными МО в интервале энергий ионов $E_k < 13$ МэВ/н и слегка повышенные значения Fe/O при более высоких энергиях ионов. Этот факт подчеркивает также прогностическую важность FIP-эффекта при определении геоэффективности солнечных событий.

Магнитные облака с областями сжатия (оболочками), являющиеся источниками мощных геомагнитных бурь, обладают в течениях СВ более высоким относительным содержанием ионов Fe, сопоставимым с его содержанием в потоках частиц от длительных вспышек. Анализ энергетических спектров ионов Fe и O в потоках девяти МО, которые явились источниками мощных геомагнитных бурь, показал, что индекс Fe/O является индикатором физического состояния исследуемой среды. В области турбулентного сжатия плазмы во всем диапазоне энергий ионов $\text{Fe/O} \ll 1$, что свидетельствует о слабой эффективности рассеяния альвеновской турбулентностью ионов O с высоким FIP. В МО в диапазоне энергий 0.2–0.6 МэВ/н $\text{Fe/O} \sim 1$. Это может быть связано с усилением рассеяния на альвеновских волнах или с эффектом преимущественного накопления ионов с низким FIP в МО перед КВМ.

3.2. Влияние степени ионизации ионов на проявление FIP-эффекта в корональных выбросах массы

Для анализа были выбраны 17 КВМ (1998–2006 гг.), которые обладали ярко выраженным передним ударным фронтом при самом высоком уровне достоверности. Согласно классификации SOHO, они имели индекс Shock 4. Все КВМ были структурами с гало. В ходе распространения КВМ в короне и межпланетной среде его магнитная структура расширяется вслед за идущей впереди ударной волной. Область турбулентного сжатия плазмы, которая располагается непосредственно за фронтом ударной волны, характеризуется сильными вариациями компонент ММП B , повышенными значениями плотности N_p , скорости V_p и температуры T_p протонов [Ермолаев и др., 2009]. За областью турбулентного сжатия (оболочки) располагается собственно тело КВМ. Данные,

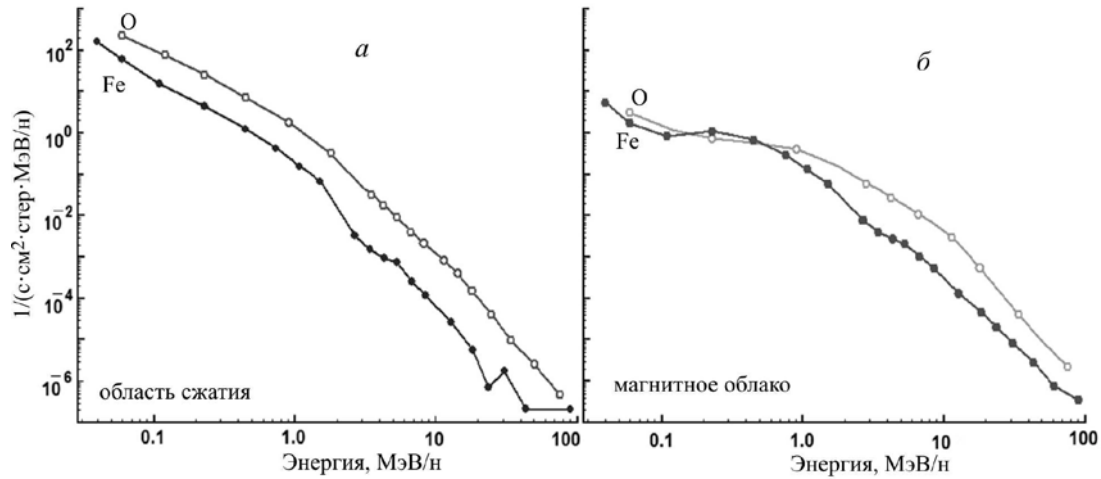


Рис. 8. Энергетические спектры ионов Fe и O для области сжатия (а) и магнитного облака (б) в плазме KBM 9–10 ноября 2004 г.

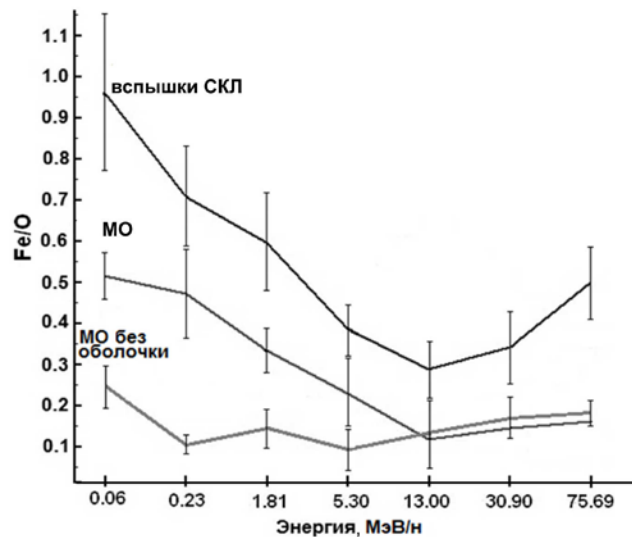


Рис. 9. Изменения средних Fe/O с энергией ионов в различных проявлениях солнечной активности: в потоках частиц GLE, в МО. Нижняя кривая — МО в отсутствие ударного фронта KBM и области турбулентного сжатия (МО без оболочки)

описывающие временные границы каждой из структур KBM, были взяты в Wind ICME Catalogue [<https://wind.nasa.gov/fullcatalogue.php>].

При развитии активного процесса часть вспышечной плазмы может проникнуть в область KBM, т. е. спектр ускоренных частиц в этой зоне будет носить смешанный характер. В этой связи особую роль играет величина $Fe/O > 1$, которая является следствием FIP-эффекта, поскольку популяция частиц, ускоренных вспышкой, сильно обогащена Fe. Ускоренные ударными волнами KBM частицы, напротив, обеднены Fe ($Fe/O < 1$).

Использовались усредненные за 1 ч данные наблюдений на КА ACE/SWICS, которые представлены только в одном диапазоне энергий ионов $E_k = 0.5 \div 100$ кэВ/е. Кроме значений отношения Fe/O , были привлечены показатели, характеризующие степень ионизации ионов Fe и O, $Q(Fe)$, $Q(O)$. Для количественной оценки значений $Q(Fe)$ и Fe/O рассчитаны их средние величины в 6-часовом ин-

тервале в период повышения временных профилей этих параметров (табл. 6).

На рис. 10, 11 показаны изменения скорости ионов O и Fe со временем, их степени ионизации $Q(O)$, $Q(Fe)$ и отношения Fe/O для KBM, возникших в результате развития мощных GLE. Вертикальными штриховыми линиями слева направо показаны момент прихода фронта ударной волны (УФ) KBM, область турбулентного сжатия плазмы (оболочка) и тело KBM (между второй и третьей штриховыми линиями).

Заметим, что проявление FIP-эффекта, связанного с ростом относительного содержания ионов Fe (низкий FIP) по отношению к ионам O (высокий FIP), усиливается в тех случаях, когда в плазме KBM присутствует ионы с повышенными зарядовыми состояниями $Q(Fe)$ (15–16 июля 2000 г.). Для KBM 26–27 августа 2002 г., напротив, характерны пониженные, фактически фоновые, значения $Q(Fe)$ и соответственно Fe/O не показывает такого усиления.

Таблица 6

Время прохождения структурных элементов КВМ, электрическое поле E , степень ионизации ионов железа Q и отношение Fe/O в плазме выброса

№	Прибытие ударного фронта КВМ	Конец оболочки/Начало тела КВМ	Конец КВМ	E , мВ/м	$Q(\text{Fe})$	Fe/O
1	04:20.08.11.1998	08:00.08.11.	23:31.08.11.	7.09 ± 0.16	13.18 ± 0.18	0.37 ± 0.05
2	14:17.15.07.2000	19:10.15.07.	14:30.16.07.	21.61 ± 6.89	16.80 ± 0.18	0.81 ± 0.17
3	18:19.11.08.2000	06:05.12.08.	05:05.13.08.	14.55 ± 1.19	14.92 ± 0.17	0.63 ± 0.04
4	00:14.31.03.2001	12:00.31.03.	02:00.02.04.	15.47 ± 2.14	15.58 ± 0.19	0.79 ± 0.13
5	23:57.17.04.2001	06:20.18.04.	07:20.19.04.	4.28 ± 1.53	10.35 ± 0.06	0.23 ± 0.02
6	04:28.28.04.2001	17:59.28.04.	04:48.02.05.	—	15.99 ± 0.11	0.88 ± 0.10
7	02:33.28.10.2001	11:00.28.10.	03:17.30.10.	5.92 ± 0.43	14.36 ± 0.89	0.40 ± 0.05
8	05:51.24.11.2001	15:47.24.11.	13:17.25.11.	5.38 ± 3.45	13.26 ± 0.32	0.53 ± 0.06
9	04:08.23.04.2002	07:11.24.04.	23:59.24.04.	0.44 ± 0.07	11.37 ± 0.07	0.18 ± 0.01
10	10:20.26.08.2002	14:23.26.08.	13:40.27.08.	2.46 ± 0.41	9.41 ± 0.07	0.27 ± 0.01
11	05:51.29.10.2003	11:16.29.10.	10:00.30.10.	—	16.31 ± 0.25	0.79 ± 0.15
12	16:00.30.10.2003	04:30.31.10.	23:00.02.11.	—	16.77 ± 0.20	1.20 ± 0.23
13	05:53.04.11.2003	14:00.04.11.	12:00.06.11.	0.87 ± 0.05	9.74 ± 0.07	0.16 ± 0.01
14	18:24.09.11.2004	20:38.09.11.	16:47.10.11.	15.80 ± 0.85	13.87 ± 0.18	0.64 ± 0.08
15	16:48.21.01.2005	23:45.21.01.	19:12.22.01.	1.75 ± 0.60	12.23 ± 0.28	0.21 ± 0.07
16	02:19.15.05.2005	04:17.15.05.	22:47.16.05.	22.51 ± 7.16	16.34 ± 0.19	0.89 ± 0.09
17	13:57.14.12.2006	22:36.14.12.	13:40.15.12.	12.43 ± 0.50	16.31 ± 0.10	0.51 ± 0.10

Вероятно, это свидетельствует об отсутствии более энергичной всплывающей плазмы в структуре КВМ.

Рассмотрение временных изменений параметров для всех выбранных КВМ указывает на их индивидуальные свойства, связанные с составом плазмы в выбросе, что проявляется в различных значениях $Q(\text{Fe})$, $Q(\text{O})$ и Fe/O. Для количественного описания параметров $Q(\text{Fe})$, Fe/O в каждом КВМ были рассчитаны их средние значения в 6-часовом интервале в период повышения временных профилей этих индексов. Была замечена еще одна особенность в структуре КВМ. Область турбулентного сжатия, характеризующаяся высокими значениями V , N_p , B ,

T , связанными с ударной волной КВМ, как правило, не показывает роста $Q(\text{Fe})$, $Q(\text{O})$, Fe/O. Это свидетельствует о слабой эффективности рассеяния ионов альвеновской турбулентностью в этой области (турбулентность альвеновских волн существует и позади ударной волны).

В табл. 6 показано время прохождения всех структурных элементов рассмотренных КВМ: фронта ударной волны, области турбулентного сжатия (оболочки) и собственно тела выброса. Для плазмы рассмотренных КВМ в отдельных столбцах таблицы представлены напряженность электрического поля E , зарядовые состояния ионов железа $Q(\text{Fe})$ и отношение Fe/O с указанием ошибок усреднения.

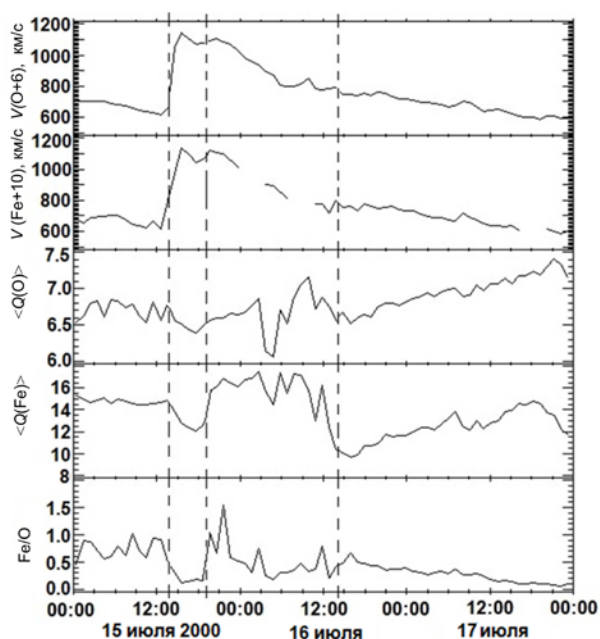


Рис. 10. Изменения со временем физических параметров в структуре КВМ 15–16 июля 2000 г.

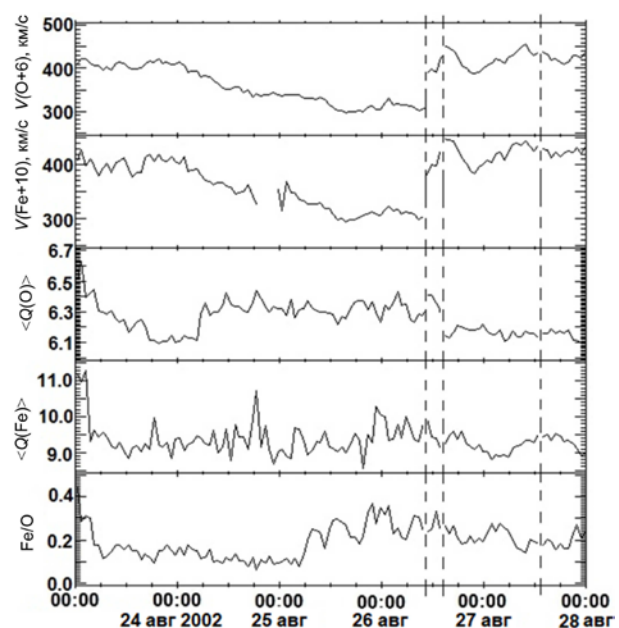


Рис. 11. Изменения со временем физических параметров в структуре КВМ 26–27 августа 2002 г.

Отметим, что средние значения Fe/O в энергетических спектрах ионов $E_k=0.06$ МэВ/н для МО (табл. 5) и в структуре КВМ (табл. 6) для $E_k=0.5\div 100$ кэВ/е показывают неплохое совпадение.

Сопоставление $Q(\text{Fe})$ и Fe/O в плазме КВМ показано на рис. 12. При $Q(\text{Fe}) < 13$ практически не наблюдается изменений Fe/O с ростом $Q(\text{Fe})$. Но при $Q(\text{Fe}) \geq 13$ резко усиливается проявление FIP-эффекта, связанное с увеличением относительного содержания ионов Fe. Это связано, вероятно, с присутствием вспышечной плазмы в теле выбросов.

Полученный результат согласуется с выводами, изложенными в работе [Zurbuchen et al., 2016], посвященной изучению относительных содержаний различных элементов в структуре КВМ, при этом была установлена тенденция к усилению влияния FIP-эффекта при росте $Q(\text{Fe})$.

Специальное исследование было посвящено выявлению в структуре КВМ корреляционной связи между изменениями V , B , N_p , E , T и значениями Fe/O, $Q(\text{Fe})$. Из всех рассмотренных параметров наилучшую корреляцию с изменениями $Q(\text{Fe})$ и Fe/O в плазме КВМ показывают значения E , имеющие естественную связь с плотностью электронов (рис. 13).

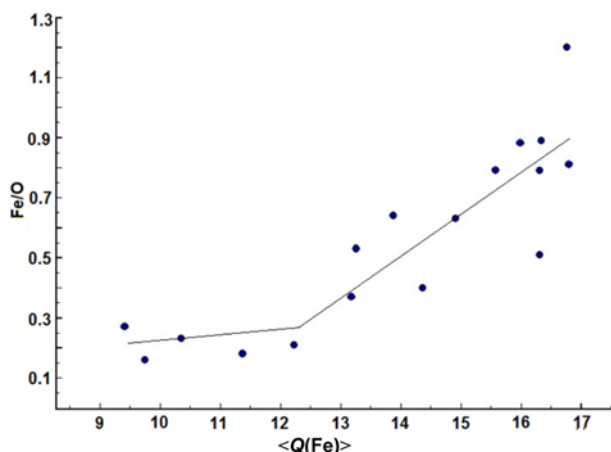


Рис. 12. Сопоставление степени ионизации Fe со значениями Fe/O для рассмотренных КВМ

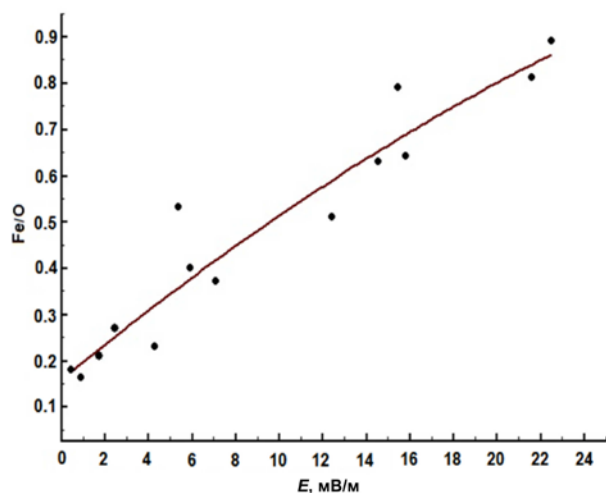


Рис. 13. Зависимость напряженности электрического поля E мВ/м от отношения Fe/O по наблюдениям в плазме КВМ

Таким образом, наиболее вероятной причиной повышения $Q(\text{Fe})$ и соответственно Fe/O можно считать проникновение в тело КВМ энергичной вспышечной плазмы, значительно обогащенной электронами, в начальной фазе его развития. Относительный вклад вспышечного потока можно оценить по изменению плотности электронов в плазме КВМ относительно его фона в СВ (данные с КА Wind). При отсутствии вспышечного вклада или при его малости усиление плотности электронов составляет $\Delta N_e = 0.5 \div 1.0 \text{ см}^{-3}$, при значительном вкладе — $\Delta N_e = 5 \div 10 \text{ см}^{-3}$.

4. ВЛИЯНИЕ АНОМАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ПОВЕДЕНИЕ ИНДЕКСА Fe/O В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Продолжительный минимум 23-го цикла активности дал возможность в течение длительного времени проследить за вариациями потоков примесных химических элементов в СВ. За всю историю регулярных наблюдений Солнца с 1700 г. лишь 11-й и 14-й циклы активности в стадии минимума имели более низкие значения чисел Вольфа по сравнению с 23-м циклом. Декабрь 2008 г. был определен как минимум предыдущего цикла активности, поэтому для исследования СВ был выбран промежуток с 1 апреля 2007 по 31 декабря 2009 г. За этот период в течение 669 дней на Солнце вообще отсутствовали активные области. В остальные дни регистрировались лишь поры и пятна с очень небольшими площадями, что не привело к появлению заметных возмущений в СВ.

Обзор фильтрограмм с космической обсерватории SDO/AIA 171 Å, 304 Å и 1700 Å показал, что основными проявлениями активности Солнца в периоды с отсутствием пятен являются небольшие участки повышенной яркости в короне в виде отдельных сгустков тонких плазменных струй, поднимающихся на небольшую высоту. Они не создают видимых структур в форме замкнутых петель, подобных существующим в активных областях. В фотосфере в области локализации этих струй расположены светлые факельные площадки. Практически по всему диску Солнца в это время наблюдаются яркие рентгеновские точки (в том числе и в КД) — проявления мелкомасштабных процессов пересоединения. В этот же период существуют обширные темные КД (источники быстрого СВ), причем не только в полярных, но и в экваториальных областях.

Для трех временных интервалов с полным отсутствием пятен в разные годы минимума цикла были построены энергетические спектры ионов O и Fe, общий диапазон энергий для ионов составил 0.06–500 МэВ/н (рис. 14). Начала интервалов времени при построении энергетических спектров сдвигались на трое суток вперед, чтобы получить параметры спокойного СВ. Кроме того, к использованным ранее в расчетах Fe/O семи интервалам энергий (см. введение), был добавлен восьмой со средним значением 192.39 МэВ/н.

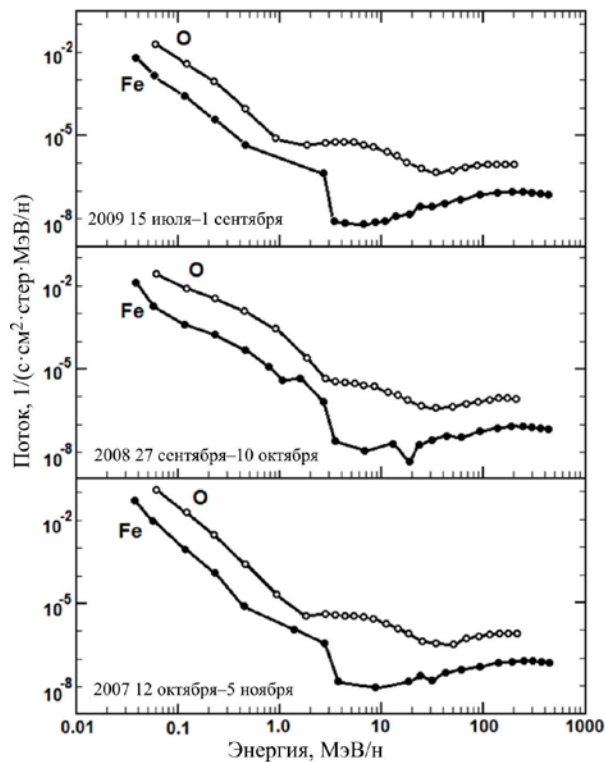


Рис. 14. Энергетические спектры ионов Fe и O различного происхождения (<2 МэВ/н — солнечные; >2 МэВ/н — АКЛ и ГКЛ) в интервалы времени с отсутствием активных областей на Солнце

Все представленные ниже исследования свойств потоков частиц разных энергий были проведены с помощью построения энергетических спектров ионов, в том числе для Fe и O и вычисления с их помощью значений Fe/O, которые являются индикаторами физического состояния изучаемой среды [Томозов, 2012].

Структура и свойства состава примесных элементов в потоках плазмы СВ определяются двумя основными факторами — генерацией энергичных частиц на Солнце и условиями их распространения в межпланетной среде, а также приходом ГКЛ в гелиосферу. Основными причинами, влияющими на изменение условий распространения малоэнергичной части ГКЛ, является количество и характер распределения магнитных неоднородностей, а также флуктуации магнитного поля в гелиосфере. Отсутствие активных областей на Солнце приводит к минимизации источников рассеяния ГКЛ в гелиосфере и соответственно к усилению влияния ГКЛ. С ростом энергий ионов Fe и O значения Fe/O могут последовательно описывать основные характеристики СВ. При $E_k < 2$ МэВ/н преобладает влияние Солнца, при $E_k = 2 \div 30$ МэВ/н — воздействие АКЛ, при $E_k > 30$ МэВ/н — влияние частиц ГКЛ [Garrard et al., 1997].

Рассчитанные и представленные на рис. 14 энергетические спектры ионов Fe и O для СВ в условиях отсутствия пятен на Солнце обладают некоторыми особенностями. Обычно гладкие профили спектров в этих случаях демонстрируют аномальное поведение с довольно существенным провалом для ионов Fe в диапазоне энергии $\sim 2\text{--}30$ МэВ/н, в то же время

профили спектров ионов O, напротив, не показывают спада и демонстрируют слабое усиление. При энергиях $E_k > 30$ МэВ/н вместо обычного падения для этого интервала энергий наблюдается устойчивый рост значений потоков O и Fe благодаря влиянию ГКЛ.

Частицы АКЛ образуются при проникновении из межзвездной среды в гелиосферу нейтральных атомов с высоким FIP (H, He, N, O и Ne). Затем они ионизируются вследствие обмена зарядами с протонами СВ или под действием УФ-излучения Солнца и захватываются СВ [Fisk et al., 1974; Reames, 2001]. Приближаясь к Солнцу, они выносятся в потоке СВ наружу и, достигнув границы гелиосферы, ускоряются на пограничной ударной волне механизмом Ферми до энергий ~ 10 МэВ/н. Затем они могут вновь возвратиться к Солнцу. Доказано, что этот процесс может повторяться неоднократно. Отметим, что ионы элементов с низким FIP ионизируются уже в локальной межзвездной среде и не способны проникать внутрь гелиосферы. В результате действия предложенного механизма ускорения частиц АКЛ предполагается увеличение потоков элементов с высоким FIP, в том числе и кислорода. В то же время элементы с низким FIP не должны показывать такого увеличения — это относится к ионам C, Mg, Si, Fe.

С использованием значений потоков ионов Fe и O было рассчитано их относительное содержание в СВ для 8 интервалов энергий в периоды отсутствия пятен (табл. 7).

Влияние АКЛ приводит к минимальным значениям $Fe/O = 0.004$ и 0.010 при $E_k = 5.3$ и 13.0 МэВ/н соответственно. Подчеркнем, что при появлении активных областей на Солнце энергетические спектры для всех элементов становятся подобными и показывают непрерывное быстрое падение потоков ионов, особенно при энергиях в сотни МэВ/н.

На рис. 15 показаны полученные кривые изменения Fe/O в СВ и потоках частиц при развитии импульсных вспышечных событий в разных интервалах энергий ионов. Применение энергетических спектров Fe и O позволило использовать довольно широкий интервал энергий при расчете их относительных содержаний.

Для импульсных событий и СВ при отсутствии пятен наблюдаются заметные вариации Fe/O с изменением энергий ионов. Отмечается тенденция существенного превышения Fe/O во вспышечных энергичных потоках над Fe/O в СВ при $E_k < 30$ МэВ/н, причем при более высоких энергиях ионов это превышение становится существенно меньшим. Кривые изменения Fe/O для импульсных вспышечных событий и СВ в условиях минимальной активности показывают подобный ход в интервале малых энергий ионов $0.06\text{--}2.00$ МэВ/н.

При $E_k = 1.81$ МэВ/н на обеих кривых наблюдаются максимальные значения Fe/O. Таким образом, несмотря на разницу в абсолютных значениях Fe/O, в импульсных вспышках во время обычной активности и в спокойных условиях на Солнце происходят процессы, приводящие к относительному усилению в СВ содержания ионов Fe по отношению к ионам O.

Таблица 7

Значения Fe/O в СВ в восьми интервалах энергий в периоды отсутствия пятен на Солнце

Периоды отсутствия пятен	Fe/O							
	0.06 МэВ/н	0.23 МэВ/н	1.81 МэВ/н	5.30 МэВ/н	13.00 МэВ/н	30.90 МэВ/н	75.69 МэВ/н	192.39 МэВ/н
12.10–05.11 2007	0.076	0.052	0.188	0.005	0.009	0.040	0.087	0.097
27.09–10.10 2008	0.079	0.055	0.109	0.007	0.016	0.072	0.093	0.107
15.07–01.09 2009	0.075	0.045	0.152	0.001	0.005	0.048	0.086	0.099
Среднее	0.077± 0.001	0.051± 0.003	0.150± 0.023	0.004± 0.002	0.010± 0.003	0.053± 0.010	0.089± 0.002	0.101± 0.003

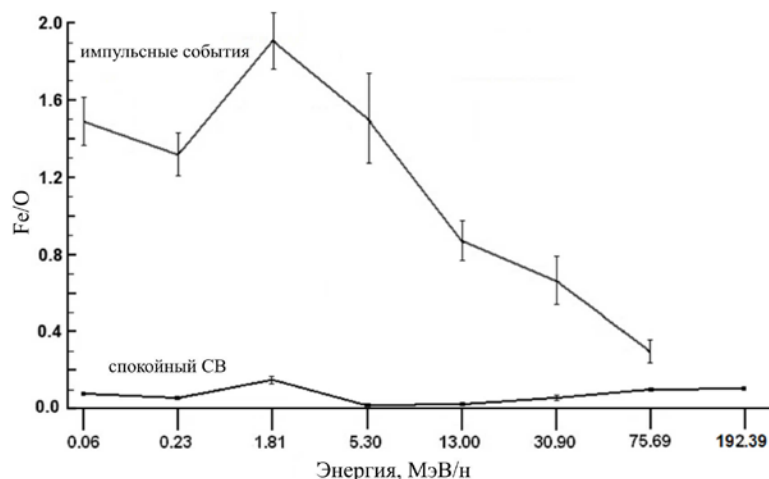


Рис. 15. Сопоставление отношения Fe/O на 1 а. е. в периоды отсутствия пятен на Солнце и в потоках частиц от импульсных событий для разных интервалов энергий

5. ПОВЕДЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ Fe/O В ПОТОКАХ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ В МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Представляет интерес исследование поведения потоков ГКЛ в интервале энергий $E_k > 30$ МэВ/н различных ионов, включая Fe и O. При исследовании свойств ГКЛ в настоящей работе особое внимание было уделено поиску интервалов времени существования СВ в условиях слабой активности с фоновыми значениями параметров. Кроме изложенных в предыдущих работах [Desai et al., 2006; Зельдович и др., 2010] требований к выбору интервалов, был применен дополнительный, еще более тщательный подход. В результате были выбраны шесть периодов наблюдения СВ, когда не только выполнялись условия полного отсутствия пятен на Солнце, но и отсутствовало влияние быстрых течений плазмы из КД с открытой структурой магнитных силовых линий. Было исключено также воздействие различных высокоскоростных потоков, которые образуются на границах секторов, разделяющих разнополярные области ММП, при движении через них СВ. Таким образом, исключалось влияние различных высокоскоростных потоков ($V_{СВ} < 480$ км/с) и потоков частиц с высокими значениями плотности ($N_p < 16$ см⁻³).

Значения усредненного вектора напряженности ММП и его вертикальной компоненты также не превышали величин, соответствующих полю в плазме СВ при подобных условиях.

Такой детальный учет возможных причин, приводящих к активизации плазменных потоков, позволил исследовать состав примесных элементов в плазме СВ вблизи внешних границ магнитосферы Земли (табл. 8, 1-й столбец). Известно, что ГКЛ состоят в основном из ядер водорода (~92 %) и He (~7 %). В то же время более тяжелые ядра (1 %) несут большую часть информации о происхождении КЛ по данным об их элементном и изотопном составе. Данные изотопного спектрометра (CRIS) на КА ACE позволяют исследовать характеристики ядер ГКЛ в диапазоне энергий $E_k = 30 \div 500$ МэВ/н. Для шести выбранных временных интервалов были построены энергетические спектры девяти элементов (O, Mg, Si, Ne, Fe, S, Ca, Ni, Ar) при максимальном присутствии ГКЛ в СВ. На рис. 16 для примера приведены энергетические спектры ГКЛ для периода 25 июля – 8 августа 2008 г.

Энергетические спектры для всех элементов характеризуются ростом значений с максимумами при $E_k \sim 100 \div 300$ МэВ/н. Отмечена также следующая закономерность: чем выше заряд элемента, тем при более высоких энергиях наблюдается максимум значения потока ГКЛ. Для большей части рассмотренных элементов наблюдается относительное усиление примерно на порядок потоков частиц в области энергий ГКЛ.

Таблица 8

Содержание тяжелых элементов относительно кислорода для шести периодов низкой солнечной активности

Периоды низкой солнечной активности	Ne/O	Mg/O	Si/O	S/O	Ar/O	Ca/O	Fe/O	Ni/O
22.07–25.07 2007	0.130	0.225	0.134	0.0227	0.0106	0.0194	0.101	0.00546
13.10–17.10 2007	0.143	0.179	0.134	0.0212	0.00439	0.0192	0.0970	0.00454
25.07–08.08 2008	0.163	0.214	0.147	0.0247	0.00683	0.0193	0.100	0.00455
07.10–10.10 2008	0.156	0.185	0.149	0.0235	0.0113	0.0231	0.100	0.00463
10.08–20.08 2009	0.156	0.196	0.146	0.0207	0.00963	0.0180	0.0930	0.00412
05.09–13.09 2009	0.207	0.207	0.153	0.0279	0.00891	0.0174	0.104	0.00484
Среднее	0.153± 0.006	0.201± 0.007	0.144± 0.003	0.0234± 0.0011	0.00861± 0.00105	0.0194± 0.0008	0.0991± 0.0015	0.00469± 0.00018

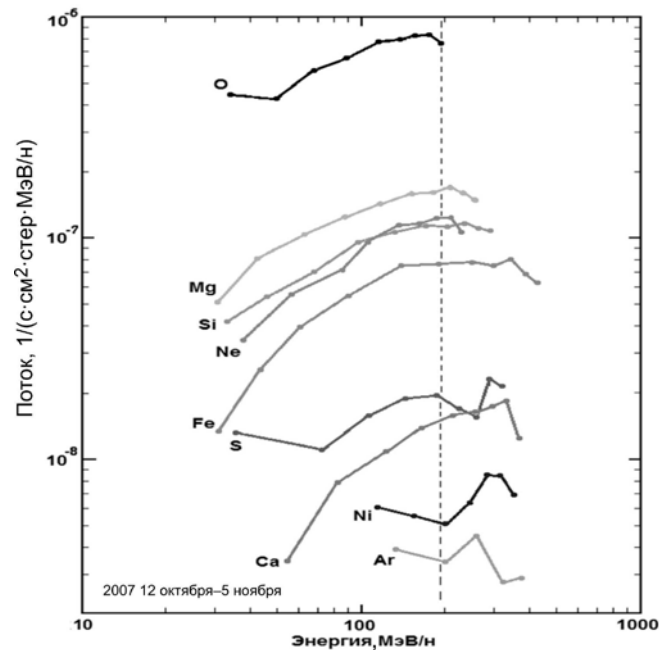


Рис. 16. Энергетические спектры девяти элементов в потоках СВ в период отсутствия активности. Подъем значений потоков ионов в составе СВ для $E_k > 30$ МэВ/н определяется в основном присутствием ГКЛ. Вертикальная штриховая линия соответствует энергии 192.39 МэВ/н

С использованием данных о потоках ионов можно определить относительные содержания тяжелых элементов. Это было сделано для энергии $E_k = 192.39$ МэВ/н, вблизи которой наблюдаются максимумы потоков с наибольшим относительным содержанием тяжелых элементов ГКЛ. Рассчитаны значения содержаний восьми тяжелых элементов относительно кислорода.

В табл. 8 представлены значения относительного содержания восьми тяжелых элементов в составе ГКЛ для энергии 192.39 МэВ/н.

Величины относительных содержаний каждого из элементов для всех шести временных интервалов при энергии $E_k = 192.39$ МэВ/н показывают близкие значения, поэтому ошибка определения средних значений составляет менее $\pm 5\%$.

Результаты, представленные на рис. 16, позволяют условно разделить данные о потоках тяжелых элементов на две группы: Ne, Mg, Si, Fe, имеющие содержание в потоках, близкое легким элементам (C и N), и S, Ar, Ca, Ni — с гораздо меньшим содержанием.

На рис. 17 показано сравнение относительных содержаний тяжелых элементов в составе ГКЛ, а

также в фотосфере Солнца и потоках частиц от длительных вспышек [Reames, 2014]. Для удобства сравнения с разными структурными образованиями все значения содержания тяжелых элементов отнесены к O, обилие которого было принято за 1000.

Сопоставление относительных содержаний тяжелых элементов в ГКЛ и длительных вспыхивающих потоках показывает на их неплохое совпадение. В результате складывается такая картина — в минимуме солнечного цикла и в условиях отсутствия активности вблизи магнитосферы Земли присутствуют потоки ГКЛ с энергиями 30–500 МэВ/н, имеющие относительные содержания тяжелых элементов, подобные длительным вспыхивающим потокам в условиях высокой активности Солнца.

Значения Fe/O, рассчитанные для довольно длительных периодов с отсутствием пятен на Солнце (табл. 7) и для более коротких интервалов времени существования спокойного без всяких возмущений СВ (табл. 9), показывают хорошее совпадение в интервалах энергий ГКЛ. Подобные результаты получаются также при использовании энергетических спектров ионов Fe и O, построенных при интегриро-

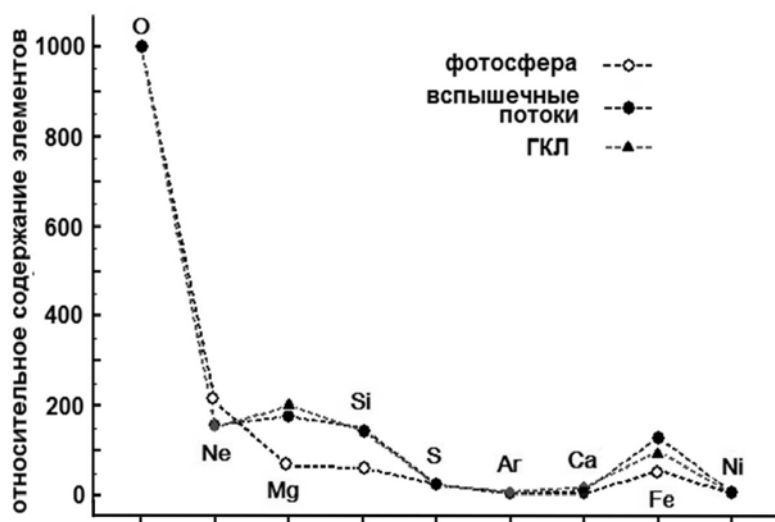


Рис. 17. Сопоставление относительных содержаний элементов в фотосфере во вспышечных потоках и ГКЛ

Таблица 9

Значение индекса Fe/O для потоков с преобладающим влиянием ГКЛ в различных интервалах энергий

Периоды низкой солнечной активности	Fe/O				
	30.90 МэВ/н	49.82 МэВ/н	75.69 МэВ/н	140.39 МэВ/н	192.39 МэВ/н
22.07–25.07 2007	0.101	0.082	0.087	0.094	0.101
13.10–17.10 2007	0.033	0.122	0.063	0.083	0.097
25.07–08.08 2008	0.032	0.074	0.092	0.097	0.100
07.10–10.10 2008	0.064	0.072	0.090	0.092	0.100
10.08–20.08 2009	0.042	0.081	0.095	0.095	0.093
05.09–13.09 2009	0.054	0.088	0.100	0.086	0.104
Среднее	0.054±0.011	0.086±0.007	0.088±0.005	0.091±0.002	0.099±0.002

вании по всему периоду минимума цикла с 1 апреля 2007 до 1 января 2010 г. Это указывает на то, что достаточным условием наличия потоков ГКЛ вблизи орбиты Земли является отсутствие активных областей на Солнце, которые являются основными источниками возмущений в среде, препятствующих распространению ГКЛ в гелиосфере.

Что касается содержания Fe и O, данные наблюдений с КА ACE (SIS, CRIS) показывают, что при энергии $E_k \sim 200$ МэВ/н их количества практически совпадают в потоках частиц от длительных вспышек и в составе ГКЛ в период отсутствия пятен на Солнце. Для более энергичных частиц их доля в составе ГКЛ существенно превосходит долю вспышечных частиц подобных энергий.

Для объяснения отсутствия заметных возмущений в магнитосфере Земли в тот период, когда вблизи ее внешней границы наблюдаются ГКЛ, следует принять во внимание отсутствие направленных потоков солнечных частиц и усиленной напряженности магнитного поля при наличии B_z . При таких условиях пересоединения межпланетных и магнитосферных магнитных полей не происходит, поэтому отсутствуют разрывы во внешней граничной структуре геомагнитосферы, что не позволяет частицам ГКЛ проникать внутрь. Возможно, ГКЛ теряют энергию

в процессе столкновений с другими частицами, в том числе и на переднем фронте магнитосферы.

Таким образом, физические условия в СВ в эпоху минимума цикла солнечной активности можно условно охарактеризовать тремя основными состояниями, связанными с энергиями частиц 2–5 и 20–30 МэВ/н. При $E_k \leq 2$ МэВ/н условия в СВ определяются в основном влиянием Солнца, а при 2–30 МэВ/н проявляется вклад АКЛ. При этом для плазмы СВ в рассматриваемом спокойном состоянии возможно проявление интересного эффекта: содержание ионов элементов с более высоким FIP может превысить по сравнению с обычными условиями содержание ионов с более низким FIP (следует отметить, что этот вывод предварительный и нуждается в подтверждении).

Протоны и другие частицы с энергиями >30 МэВ/н в основном имеют галактическое происхождение [Garrard et al., 1997; Базилевская и др., 2008]. Различия значений Fe/O во вспышечных потоках энергичных частиц и соответствующих им значений Fe/O в СВ при $E_k < 30$ МэВ/н достигают величины ~ 1.5 . Для более высоких энергий при преобладающем влиянии потоков частиц ГКЛ эта разница значительно меньше. Небольшой локальный максимум отношения Fe/O (рис. 15) при энергии ионов ~ 1.81 МэВ/н в спо-

койном СВ может быть связан с процессом пересоединения магнитных полей в корональных ярких точках даже в период слабой солнечной активности. Возможно, этот процесс приводит к таким же проявлениям FIP-эффекта, как и в импульсных солнечных вспышках.

Таким образом, получает естественное объяснение причина существования низких минимальных величин $Fe/O=0.004$ и 0.010 при $E_k=5.3$ и 13.0 МэВ/н соответственно. Подчеркнем, что при появлении активных областей на Солнце спектры энергий для всех элементов становятся подобными и показывают непрерывный и быстрый спад потоков ионов, особенно в области энергий порядка сотен МэВ/н.

В минимуме солнечного цикла при отсутствии активности вблизи магнитосферы Земли присутствуют потоки ГКЛ 30–500 МэВ/н с относительными содержаниями тяжелых элементов, близкими содержаниям элементов в длительных вспышечных потоках при высокой активности Солнца.

6. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА ОСНОВЕ ВАРИАЦИИ ОТНОШЕНИЯ Fe/O В РАЗЛИЧНЫХ ИНТЕРВАЛАХ ЭНЕРГИЙ

Интересными образованиями в атмосфере Солнца применительно к процессу фракционирования элементов являются КД, основным наблюдаемым отличием которых от окружающих областей спокойного Солнца является пониженная эмиссия в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах электромагнитного спектра в короне.

В периоды спада и минимума солнечной активности возрастает роль КД как источников геомагнитных возмущений. Считается установленным фактом, что КД представляют собой области с открытыми силовыми линиями поля, вдоль которых плазма из короны вытекает в СВ. Потемнение и контраст КД связывают именно с истечением из них высокоскоростных потоков плазмы, что подтверждается выводами работы [Обридко и др., 2009].

Цель нашего изучения КД связана с выяснением характеристик примесных элементов в составе высокоскоростных потоков плазмы, являющихся источниками развития в магнитосфере Земли магнитных бурь умеренной мощности. Для этого были использованы наблюдения с КА: фильтрограммы Солнца в рентгеновском диапазоне с изображениями КД, временные изменения различных физических параметров СВ вблизи орбиты Земли, а также значения геомагнитного индекса Dst_{min} по наземным наблюдениям.

Сравнение энергетических спектров ионов Fe и O в высокоскоростных потоках СВ из экваториальных КД при наличии активных областей на Солнце и в их отсутствие показывает существенные различия не только в значениях и поведении Fe/O , но и в величинах потоков ионов разных энергий. Сопоставление характеристик долгоживущей КД 22–23 июня 2013 г., характеризующейся высокоскорост-

ным потоком СВ при наличии на Солнце групп пятен ($W=126$), с экваториальной КД 22–25 сентября 2007 г. при отсутствии пятен показало, что активность групп пятен приводит к усилению потоков Fe и O почти на два порядка в интервале энергий 0.06–1.0 МэВ/н. Таким образом, физические свойства в потоках плазмы непосредственно из зоны КД вследствие влияния активных областей оказываются сильно завуалированными. Поэтому для исследования поведения Fe/O в экваториальной КД использовались периоды с отсутствием пятен во время минимума активности цикла, но при этом в магнитосфере Земли наблюдалось развитие магнитных бурь с умеренной мощностью ($-50 \text{ нТл} > Dst_{min} > -100 \text{ нТл}$). Следует указать, что регистрируемые высокоскоростные потоки из КД при отсутствии пятен имеют физическую структуру, принадлежащую короне без влияния вспышечных и других активных процессов.

На рис. 18 показаны изменения со временем 24–30 октября 2007 г. различных физических параметров в потоках плазмы СВ в период прохождения высокоскоростных потоков из экваториальной КД и связанной с ними магнитной бури мощностью $Dst_{min} = -53 \text{ нТл}$.

Приведены пятиминутные изменения следующих параметров плазмы СВ: B (нТл) — усредненное значение общего вектора магнитного поля; B_z (нТл) — значение вертикальной компоненты магнитного поля; T (К) — температура; N_p (см^{-3}) — плотность; V (км/с) — скорость; $P_{св}$ (нПа) — давление потока; Dst (нТл) — часовой экваториальный геомагнитный индекс.

Анализ временных изменений параметров плазмы в рассмотренных событиях показывает, что приход высокоскоростных потоков плазмы из КД на орбиту Земли часто сопровождается ударным фронтом подобно КВМ, но с одним существенным отличием. В потоках плазмы из КД присутствуют скачки значений напряженности магнитного поля, температуры, плотности, газового давления, но при этом значение скорости в переднем фронте потоков из КД нарастает постепенно и только через $\sim 1-3$ сут достигает максимальных значений, а затем также медленно спадает до уровня фона. Так, на рис. 18 видно, что скорость потока достигла максимума в период, когда все остальные параметры уже показали скачки значений на переднем фронте потока. В потоке плазмы из КД лишь скорость дает повышенные значения, тогда как усиление остальных параметров заметно лишь в передней части потока.

Характерной особенностью передней возмущенной области потока плазмы является также наличие южной компоненты B_z ММП и плотности — еще одного параметра плазмы, обладающего высокими значениями. Оба этих геоэффективных параметра часто являются источниками появлений геомагнитных бурь.

На рис. 19 показано сопоставление спектров энергий ионов Fe и O во время прохождения всего потока из КД 24–30 октября 2007 г. и отдельно передней его части, представляющей область возмущенной плазмы. Для общего потока из КД при энергиях ионов $E_k=2-30$ МэВ/н, когда имеется влияние

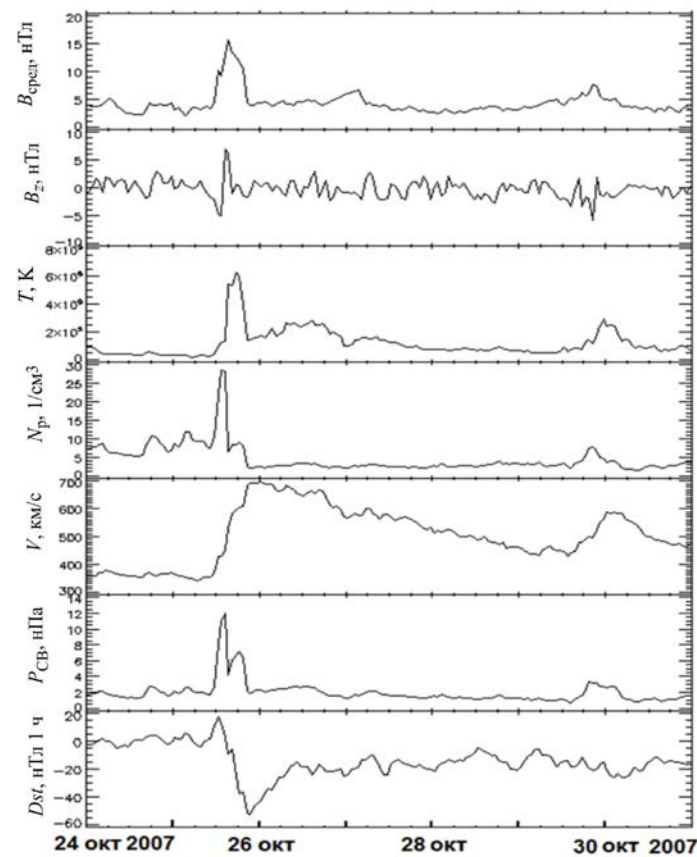


Рис. 18. Изменение физических параметров в потоке плазмы из КД, воздействие которого привело к возникновению геомагнитной бури с $Dst_{\min} = -53$ нТл

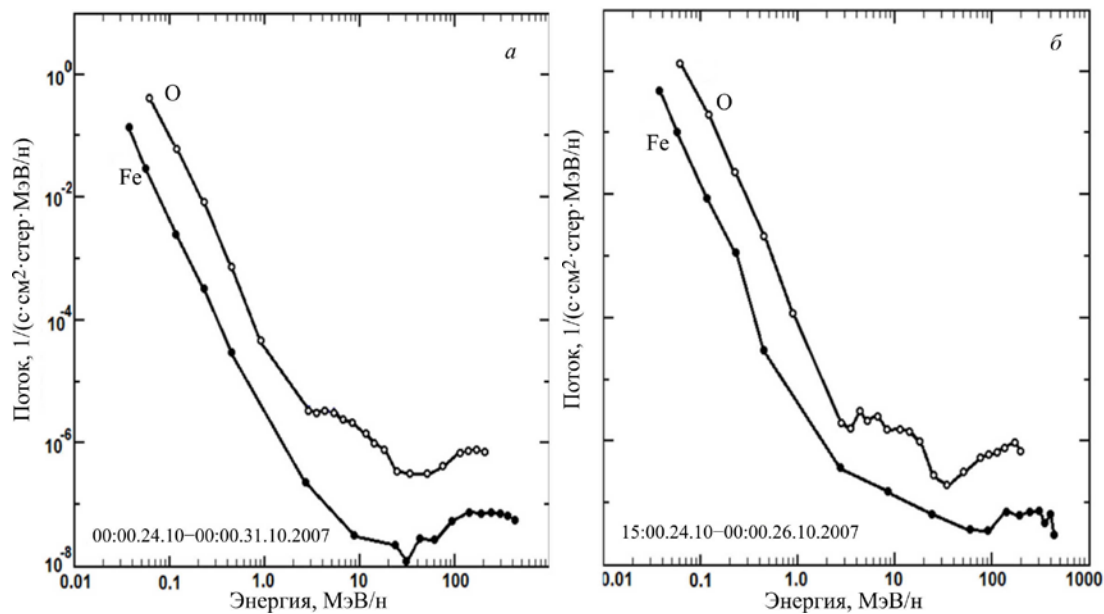


Рис. 19. Энергетические спектры ионов Fe и O в плазме потока из области КД (а) и передней возмущенной его части (б)

АКЛ, наблюдается уменьшение значений Fe/O. Если рассматривать отдельно поток из передней возмущенной области, заметно ослабленное воздействие АКЛ, что приводит к увеличению Fe/O. Это в основном связано с относительным усилением потоков ионов Fe — элемента, обладающего более низким FIP (рис. 19, б), и может происходить благодаря тому, что в ускоренной возмущенной передней части потоков из КД могут возникать альфеновские волны, приводящие

к избирательному рассеянию ионов Fe и O с учетом FIP-эффекта.

В табл. 10 на основе построенных энергетических спектров ионов Fe и O для семи ускоренных геоэффективных потоков из КД даны рассчитанные значения Fe/O в восьми интервалах энергий.

Таким образом, наиболее характерные отличительные свойства потоков из КД, в том числе и процесс возникновения геомагнитных бурь, связаны с

Таблица 10

Значение Fe/O в потоках плазмы из КД, являющихся источниками развития геомагнитных бурь при отсутствии пятен на Солнце (ионы из КД <3 МэВ/н, далее ионы АКЛ и ГКЛ)

Периоды потоков из КД в отсутствие пятен	Fe/O							
	0.06 МэВ/н	0.23 МэВ/н	1.81 МэВ/н	5.30 МэВ/н	13.00 МэВ/н	30.90 МэВ/н	75.69 МэВ/н	192.39 МэВ/н
21.03–27.03.2007	0.035	0.063	0.118	0.027	0.010	0.097	0.130	0.083
31.03–04.04.2007	0.066	0.020	0.127	0.044	0.016	0.050	0.105	0.094
24.10–30.10.2007	0.072	0.042	0.104	0.021	0.009	0.034	0.099	0.096
19.11–27.11.2007	0.138	0.077	0.181	0.016	0.008	0.059	0.072	0.112
07.03–13.03.2008	0.091	0.049	0.352	0.034	0.009	0.074	0.101	0.101
02.09–09.09.2008	0.083	0.010	0.101	0.059	0.013	0.051	0.110	0.107
19.07–26.07.2009	0.066	0.052	0.264	0.013	0.004	0.047	0.096	0.102
Среднее	0.079±0.012	0.054±0.012	0.178±0.036	0.031±0.006	0.010±0.001	0.059±0.008	0.102±0.007	0.099±0.004

возмущенной фронтальной областью потоков. При отсутствии пятен на Солнце поведение Fe/O для разных интервалов энергий ионов в общих потоках из КД и в СВ в период минимума активности показывает лишь незначительные отклонения (рис. 20).

Можно условно выделить три группы кривых на графиках, описывающих изменения отношения Fe/O с энергией ионов (рис. 20): 1 — потоки от импульсных событий и всплеск СКЛ (Fe/O~0.29÷1.91); 2 — потоки в МО, от длительных всплесков и в области турбулентного сжатия между ударной волной КВМ и МО (Fe/O~0.11÷0.52); 3 — в потоках из КД, в минимуме цикла и при отсутствии пятен на Солнце (Fe/O=0.004÷0.178).

Самые заметные подъемы Fe/O для $E_k=1.81$ МэВ/н наблюдаются в потоках частиц от импульсных событий, в области турбулентного сжатия перед МО, в потоках плазмы из КД и, наконец, при отсутствии пятен на Солнце (рис. 20). Отношения Fe/O, не показывающие роста значений при $E_k=1.81$ МэВ/н, относятся лишь к длительным событиям и к геоэффективным МО.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа физических характеристик состава плазмы в разных проявлениях солнечной активности и в ее отсутствие с помощью оценок относительных содержаний примесных ионов Fe и

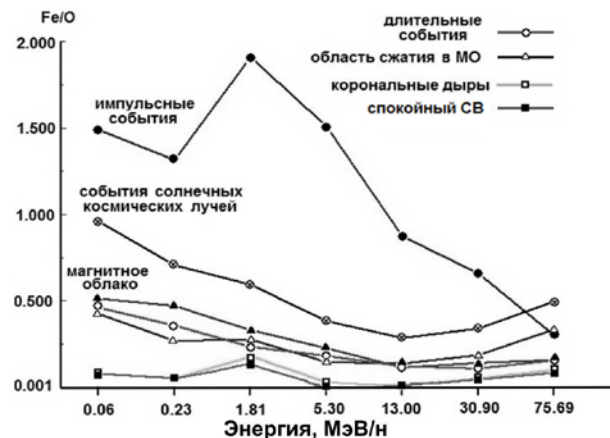


Рис. 20. Сравнение поведения отношения Fe/O с энергией ионов для различных активных процессов и в периоды минимальной активности

О в широком интервале энергий ионов можно сделать следующие выводы.

Показано, что максимальные отношения Fe/O регистрируются с КА в потоках частиц от импульсных всплесчных событий для энергий ионов <2 МэВ/н (наиболее отчетливое проявление FIP-эффекта). В потоках частиц от длительных событий Fe/O плавно спадает с ростом энергий ионов и заметно уступает значению Fe/O в потоках частиц от импульсных всплесков.

Магнитные облака как отдельный вид КВМ являются источниками сильных геомагнитных бурь и демонстрируют относительные содержания ионов Fe, сопоставимые с его обилием в потоках от длительных событий.

Установлено, что по величине Fe/O можно выявить проникновение энергичных ионов всплесчной плазмы в тело КВМ на начальной стадии его развития.

При усиленных потоках высокоэнергичных протонов (>60 МэВ/н) зарегистрированы резкие изменения в профилях энергетических спектров ионов в виде скачков потоков частиц в интервале энергий 1.5–2.5 МэВ/н, что характерно лишь для очень мощных всплесчных событий рентгенового класса X, сопровождаемых появлением высокоскоростных КВМ. Отношение Fe/O в скачке интенсивности в таких событиях может превышать единицу.

В период минимума активности с полным отсутствием пятен на Солнце отношения Fe/O в спокойном СВ показывают абсолютно низкие значения Fe/O=0.004÷0.010 в интервале энергий от 2–5 до 30 МэВ/н. Это связано с проявлением аномальной компоненты КЛ в период минимальной солнечной активности.

Таким образом, отношение Fe/O может служить важным диагностическим параметром состояния плазмы как при спокойном СВ, так и при развитии различных процессов солнечной активности.

Авторы выражают благодарность коллективам ученых, курирующих проведение экспериментов на КА ACE, SOHO, GOES, WIND за предоставление экспериментальных данных, опубликованных в интернете, а также специалистам сайта OMNI Web Plus Browser [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/flux_spectr_m.html].

Работа выполнена согласно плану работ по программе BR05336383 МОАП РК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцев А.Т., Банин В.Г., Куклин Г.В., Томозов В.М. Солнечные вспышки. М.: Наука, 1982. 246 с.
- Базилевская Г.А., Стожков Ю.И. Энергичные частицы и космические лучи: галактические, гелиосферные и солнечные космические лучи. Плазменная гелиогеофизика / под ред. Зеленого Л.М., Веселовского И.С. В 2 т. Т. 1. М., 2008. С. 345–357.
- Бархатов Н.А., Ревунова Е.А., Виноградов А.Б. Эволюция ориентации магнитных облаков солнечного ветра и проявление сезонной зависимости в их геомагнитной активности // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2014. № 4 (1). С. 106–113.
- Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды // Геофизические процессы и биосфера. 2009. Т. 8, № 1. С. 5–35.
- Зельдович М.А., Ишков В.Н., Логачев Ю.И., Кечкмети К. Ионный состав потоков малоэнергичных частиц на 1 а.е. в спокойное время солнечной активности // 31-я Всероссийская конференция по космическим лучам. Москва, МГУ, 2010. С. 1–7.
- Касинский В.В., Томозов В.М. Сравнение корональных структур в рентгеновских лучах с динамикой и морфологией фотосферной активности // Астрон. циркуляр. 1974. № 806. С. 1–3.
- Минасянц Г.С., Минасянц Т.М. Свойства развития потоков частиц солнечных космических лучей // XVIII Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2014». Санкт-Петербург, Пулково, 2014: Труды. С. 287–290.
- Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Об особенностях изменений спектров энергии во вспышечных потоках солнечных космических лучей // Изв. КРАО. 2016а. Т. 112, № 1. С. 71–77.
- Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Изменение отношения Fe/O в период возмущенной стадии развития потоков СКЛ. Проявления FIP эффекта в составе СКЛ // Геомагнетизм и аэронаука. 2016б. Т. 56, № 2. С. 217–227. DOI: [10.7868/S0016794016020115](https://doi.org/10.7868/S0016794016020115).
- Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Вариации отношения Fe/O при изменении энергии ионов в потоках ускоренных солнечных частиц // Геомагнетизм и аэронаука. 2016в. Т. 56, № 6. С. 690–699.
- Мордвинов А.В., Томозов В.М., Файнштейн В.Г. Влияние функции распределения электронов на динамику расширения бесстолкновительной плазмы в фоновую плазму меньшей плотности // Прикладная механика и техническая физика. 1985. № 6. С. 10–15.
- Обридо В.Н., Шельтинг Б.Д., Лившиц И.М., Аскеров А.Б. Связь контраста корональных дыр с характеристиками солнечного ветра // Астрономический журнал. 2009. Т. 86, № 11. С. 1125–1132.
- Прист Э.Р., Форбс Т. Магнитное пересоединение. Магнитогидродинамическая теория и приложения. М.: Физматлит, 2005. 591 с.
- Томозов В.М. FIP-эффект как индикатор динамических процессов в солнечной атмосфере и межпланетной среде // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 19. С. 19–35.
- Томозов В.М. О некоторых закономерностях распределения химического состава в атмосферах звезд // Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 23. С. 23–32.
- Томозов В.М., Строкин Н.А. Сравнительный анализ эффективности ускорения протонов и электронов в лабораторной и солнечной плазме // Геомагнетизм и аэронаука. 2015. Т. 55, № 2. С. 161–167. DOI: [10.7868/S0016794015020169](https://doi.org/10.7868/S0016794015020169).
- Barkhatov N.A., Vinogradov A.B., Levitin A.E., Revunova E.A. Geomagnetic substorm activity associated with magnetic clouds // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015. V. 55, N 5. P. 596–602. DOI: [10.1134/S0016793215050023](https://doi.org/10.1134/S0016793215050023).
- Cliver E.W., Gopalswamy E., Webb D.F. History of research on solar energetic particle (SEP) events: The evolving paradigm // *Proc. the 2008 IAU Symposium*. No. 257. Universal Heliospherical Processes. 2009. P. 401–412.
- Desai, M. I., Mason G. M., Mazur J.E., Dwyer J.R. Solar cycle variations in the composition of the suprathermal heavy-ion population near 1 AU // *Astrophys. J.* 2006. V. 645. P. L81–L84.
- Dierckx M., Tziotziou K., Dalla S., Patsou I., Marsh M.S., Crosby N.B., Malandraki O., Tsiropoulou G. Relationship between solar energetic particles and properties of flares and CME: statistical analysis of solar cycle 23 events // *Solar Phys.* 2015. V. 290, N 3. P. 841–874. DOI: [10.1007/s11207-014-0641-4](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0641-4).
- Driel-Gesztelyi L. van, Culhane J.L. Magnetic flux emergence, activity, eruptions and magnetic clouds: following magnetic field from the Sun to the heliosphere // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 144, iss. 1. P. 351–381. DOI: [10.1007/s11214-008-9461-x](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9461-x).
- Fisk L.A., Kozlovsky B., Ramaty R. An interpretation of the observed oxygen and nitrogen enhancement in low energy cosmic rays // *Astrophys. J. Let.* 1974. V. 190. P. 35–38.
- Garrard T.L., Christian E.R., Mewaldt R.A., et al. The advanced composition explorer mission. // *Proc. 25th International Cosmic Ray Conference*. Durban, South Africa, 30 July – 6 August, 1997. 1997. V. 1. P. 105–108.
- Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 88. P. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).
- Gosling J.T., Pizzo V.J. Formation and evolution of corotating interaction regions and their three-dimensional structure // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 89. P. 21–52. DOI: [10.1023/A:1005291711900](https://doi.org/10.1023/A:1005291711900).
- Kahler S.W., Cliver E.W., Tylka A.J., Dietrich W.F. A comparison of ground level event e/p and Fe/O ratios with associated solar flare and CME characteristics // *Space Sci. Rev.* 2012. V. 171, N 1–4. P. 121–139. DOI: [10.1007/s11214-011-9768-x](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9768-x).
- Kallenrode M. B. Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events // *J. Phys. G: Nuclear and Particle Phys.* 2003. V. 29. P. 965–981. DOI: [10.1088/0954-3899/29/5/316](https://doi.org/10.1088/0954-3899/29/5/316).
- Klecker B. Current understanding of SEP acceleration and propagation // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. V. 409, N 1. P. 1–15. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012015).
- Laming J.M. A unified picture of the first ionization potential and inverse first ionization potential effects // *Astrophys. J.* 2004. V. 614. P. 1063–1072. DOI: [10.1086/423780](https://doi.org/10.1086/423780).
- Li G., Zank G.P. Mixed particle acceleration at CME-driven shocks and flares // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32, N 2. P. L02101. DOI: [10.1029/2004GL021250](https://doi.org/10.1029/2004GL021250).
- Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. Fe/O ratio variations during the disturbed stage in the development of the solar cosmic ray fluxes. Manifestations of the first ionization potential effect in the solar cosmic ray composition // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. V. 56, N 2. P. 203–212. DOI: [10.1134/S0016793216020110](https://doi.org/10.1134/S0016793216020110).
- Nitta N.V., Reames D.V., De Rosa M.L., Liu Y. Solar sources of impulsive solar energetic particle events and their magnetic field connection to the Earth // *Astrophys. J.* 2006. V. 650. P. 438–450. DOI: [10.1086/507442](https://doi.org/10.1086/507442).
- Pallavicini R., Serio S., Vaiana G. A survey of soft X-ray limb flare images — The relation between their structure in the corona and other physical parameters // *Astrophys. J.* P1. 1977. V. 216. P. 108–122.
- Reames D.V., Meyer J.P., von Rosenvinge T.T. Energetic particle abundances in impulsive solar flare events //

Astrophys. J. Suppl. Ser. 1994. V. 90. P. 649–667. DOI: [10.1086/191887](https://doi.org/10.1086/191887).

Reames D.V. Solar energetic particles: A paradigm shift // Rev. Geophys. 1995. V. 33, N S1. P. 585–589. DOI: [10.1029/95RG00188](https://doi.org/10.1029/95RG00188).

Reames D.E. Energetic particles composition // Solar and galactic composition: A Joint SOHO/ACE Workshop. AIP Conf. Proc. 2001. V. 598. P. 153–164.

Reames D.V. The two sources of solar energetic particles // Space Sci. Rev. 2013. V. 175, N 1. P. 53–92. DOI: [10.1007/s11214-013-9958-9](https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9).

Reames D.V. Element abundances in solar energetic particles and the solar corona // Solar Phys. 2014. V. 289, N 3. P. 977–993. DOI: [10.1007/s11207-013-0350-4](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0350-4).

Reames D.V., Ng C.K. Heavy-element abundances in solar energetic particle events // Astrophys. J. 2004. V. 610, N 1. P. 510–522. DOI: [10.1086/421518](https://doi.org/10.1086/421518).

Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties // Solar Phys. 2010. V. 264. P. 189–237. DOI: [10.1007/s11207-010-9568-6](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6).

Roth I., Temerin M. Selective ion acceleration in impulsive solar flares // Adv. Space Res. 1998. V. 21. P. 591–595.

Somov B.V. Plasma Astrophys.: Reconnection and Flares // Springer: New York. 2013. 504 p. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00968-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00968-X).

Torsti J., Kocharov L., Innes D.E., et al. Injection of energetic protons during solar eruption on 1999 May 9: Effect of flare and coronal mass ejection // Astron. Astrophys. 2001. V. 365. P. 198–203. DOI: [10.1051/0004-6361:20000148](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000148).

Tylka A.J., Cohen C.M.S., Dietrich W.F., et al. Shock geometry, seed populations and the origin of variable elemental composition at high energies in large gradual solar particle events // Astrophys. J. 2005. V. 625, N 1. P. 474–495. DOI: [10.1086/429384](https://doi.org/10.1086/429384).

Wang Y.-M., Pick M., Mason G.M. Coronal holes, jets and the origin of ³He-rich particle events // Astrophys. J. 2006. V. 639, N 1. P. 495–509. DOI: [10.1086/499355](https://doi.org/10.1086/499355).

Yutian Chi, Chenglong Shen, Yuming Wang, et al. Statistical Study of the Interplanetary Coronal Mass Ejections from 1996 to 2014 // arXiv: 1504.07849v1 [astro-ph.SR] 29 Apr 2015. P. 1–9.

Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Kundu M.R., White S.M. On the temporal relationship between coronal mass ejections and flares // Astrophys. J. 2001. V. 559, N 1. P. 452–462. DOI: [10.1086/322405](https://doi.org/10.1086/322405).

Zurbuchen T.H., Weberg M., von Steiger R., et al. Composition of coronal mass ejections // Astrophys. J. 2016. V. 826, N 10. 8 p. DOI: [10.3847/0004-637X/826/1/10](https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/10).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/flux_spectr_m.html (accessed 18.10.2017).

URL: <http://www.srl.caltech.edu/sampex/Data-Center/DA-TA/EventSpectra> (accessed 18.10.2017).

URL: <https://wind.nasa.gov/fullcatalogue.php> (accessed 18.10.2017).

REFERENCES

Altynsev A.T., Banin V.G., Kuklin G.V., Tomozov V.M. *Solnechnye vspyshki* [Solar Flares]. Moscow: Nauka Publ., 1982. 246 p. (In Russian).

Barkhatov N.A., Revunova E.A., Vinogradov A.B. Evolution of orientation of solar wind magnetic clouds, and manifestation of seasonal dependence in their geomagnetic activity. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod]. 2014, no. 4 (1), pp. 106–113. (In Russian).

Barkhatov N.A., Vinogradov A.B., Levitin A.E., Revunova E.A. Geomagnetic substorm activity associated with magnetic clouds. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2015, vol. 57

no. 5, pp. 596–602. DOI: [10.1134/S0016793215050023](https://doi.org/10.1134/S0016793215050023).

Bazilevskaya G.A., Stozhkov Yu.I. *Energichnye chastitsy i kosmicheskie luchy: galakticheskie, geliosfernye i solnechnye kosmicheskie luchy. Plazmennaya geliofizika* [Energetic particles and cosmic rays: galactic, heliospheric and solar cosmic rays]. Eds. Zeleny L.M., Veselovsky I.S. V. 1. Moscow, 2008. P. 345–357. (In Russian).

Cliver E.W., Gopalswamy E., Webb D.F. History of research on solar energetic particle (SEP) events: The evolving paradigm. *Proc. the 2008 IAU Symposium. No. 257. Universal Heliophysical Processes*. 2009, pp. 401–412.

Desai M. I., Mason G. M., Mazur J.E., Dwyer J.R. Solar cycle variations in the composition of the suprathermal heavy-ion population near 1 AU. *Astrophys. J.* 2006, vol. 645, pp. L81–L84.

Dierckx M., Tziotziou K., Dalla S., Patsou I., Marsh M.S., Crosby N.B., Malandraki O., Tsiropoulou G. Relationship between solar energetic particles and properties of flares and CME: statistical analysis of solar cycle 23 events. *Solar Phys.* 2015, vol. 290, no. 3. pp. 841–874. DOI: [10.1007/s11207-014-0641-4](https://doi.org/10.1007/s11207-014-0641-4).

Driel-Gesztelyi L. van, Culhane J.L. Magnetic flux emergence, activity, eruptions and magnetic clouds: following magnetic field from the Sun to the heliosphere. *Space Sci. Rev.* 2009, vol. 144, iss. 1, pp. 351–381. DOI: [10.1007/s11214-008-9461-x](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9461-x).

Fisk L.A., Kozlovsky B., Ramaty R. An interpretation of the observed oxygen and nitrogen enhancement in low energy cosmic rays. *Astrophys. J. Let.* 1974, vol. 190, pp. 35–38.

Garrard T.L., Christian E.R., Mewaldt R.A., Ormes J.F., Stone E.C. The advanced composition explorer mission. *Proc. 25th International Cosmic Ray Conference*. Durban, South Africa, 30 July — 6 August, 1997. 1997, vol. 1, pp. 105–108.

Gonzalez W.D., Tsurutani B.T., Clua de Gonzalez A.L. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 88, pp. 529–562. DOI: [10.1023/A:1005160129098](https://doi.org/10.1023/A:1005160129098).

Gosling J.T., Pizzo V.J. Formation and evolution of corotating interaction regions and their three-dimensional structure. *Space Sci. Rev.* 1999, vol. 89, pp. 21–52. DOI: [10.1023/A:1005291711900](https://doi.org/10.1023/A:1005291711900).

Kahler S.W., Cliver E.W., Tylka A.J., Dietrich W.F. A comparison of ground level event e/p and Fe/O ratios with associated solar flare and CME characteristics. *Space Sci. Rev.* 2012, vol. 171, no. 1–4, pp. 121–139. DOI: [10.1007/s11214-011-9768-x](https://doi.org/10.1007/s11214-011-9768-x).

Kallenrode M. B. Current views on impulsive and gradual solar energetic particle events. *J. Phys. G: Nuclear and Particle Phys.* 2003, vol. 29, pp. 965–981. DOI: [10.1088/0954-3899/29/5/316](https://doi.org/10.1088/0954-3899/29/5/316).

Kasinsky V.V., Tomozov V.M. Comparison of X-ray coronal structures with dynamics and morphology of the photospheric activity. *Astronomicheskii tsirkulyar* [Astronomical Circular]. 1974, no. 806, pp. 1–3. (In Russian).

Klecker B. Current understanding of SEP acceleration and propagation. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013, vol. 409, no. 1, pp. 1–15. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012015](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012015).

Laming J.M. A unified picture of the first ionization potential and inverse first ionization potential effects. *Astrophys. J.* 2004, vol. 614, pp. 1063–1072. DOI: [10.1086/423780](https://doi.org/10.1086/423780).

Li G., Zank G.P. Mixed particle acceleration at CME-driven shocks and flares. *Geophys. Res. Let.* 2005, vol. 32, no. 2, pp. L02101. DOI: [10.1029/2004GL021250](https://doi.org/10.1029/2004GL021250).

Minasyants G.S., Minasyants T.M. Some peculiarities in dynamics of particle fluxes of solar cosmic rays. *XVIII Vserossiskaya ezhegodnaya konferentsiya po fizike Solntsa “Solnechnaya i solnechno-zemnaya fizika – 2014”* [Proc. XVIII National Conference on Solar Physics “Solar and Solar-Terrestrial Physics – 2014”]. Saint Petersburg, Pulkovo Observatory, 2014, pp. 287–290. (In Russian).

Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. On

some features in dynamics of energy spectra in flare fluxes of solar cosmic rays. *Izvestiya Krymskoi astrofizicheskoi observatorii* [Bull. of the Crimean Astrophysical Observatory]. 2016a, vol. 112, no.1, pp. 71–77. (In Russian).

Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. Variations of Fe/O ratio during the disturbed period of SCR flux development. Manifestation of FIP effect in SCR composition. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2016b, vol. 56, no. 2, pp. 217–227. (In Russian).

Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. Dynamics of Fe/O ratio during variations of ion energy in fluxes of accelerated solar particles. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2016c, vol. 56, no. 6, pp. 690–699. (In Russian).

Minasyants G.S., Minasyants T.M., Tomozov V.M. Fe/O ratio variations during the disturbed stage in the development of the solar cosmic ray fluxes. Manifestations of the first ionization potential effect in the solar cosmic ray composition. *Geomagnetizm i Aeronomy*. 2016, vol. 56, no. 2, pp. 203–212. DOI: [10.1134/S0016793216020110](https://doi.org/10.1134/S0016793216020110).

Mordvinov A.V., Tomozov V.M., Fainshtein V.G. Effect of electron distribution function on dynamics of collisionless plasma expansion into background plasma of lower density. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics]. 1985, no. 6, pp. 10–15. (In Russian).

Nitta N.V., Reames D.V., De Rosa M.L., Liu Y. Solar sources of impulsive solar energetic particle events and their magnetic field connection to the Earth. *Astrophys. J.* 2006, vol. 650, pp. 438–450. DOI: [10.1086/507442](https://doi.org/10.1086/507442).

Obriadko V.N., Shelting B.D., Livshits I.M., Askerov A.B. Correlation between contrast of coronal holes and solar wind characteristics. *Astronomicheskii zhurnal* [Astron. J.] 2009, vol. 86, no. 11, pp. 1125–1132. (In Russian).

Pallavicini R., Serio S., Vaiana G. A survey of soft X-ray limb flare images — The relation between their structure in the corona and other physical parameters. *Astrophys. J. Part 1*. 1977, vol. 216, pp. 108–122.

Priest E.R., Forbes T. *Magnitnoe peresoedinenie. Magnitogidrodinamicheskaya teoriya i prilozheniya* [Magnetic reconnection. Magnetohydrodynamic theory and applications]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 591 p. (In Russian).

Richardson I.G., Cane H.V. Near-Earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): Catalog and summary of properties. *Solar Phys.* 2010, vol. 264, pp. 189–237. DOI: [10.1007/s11207-010-9568-6](https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6).

Reames D.V., Meyer J.P., von Rosenvinge T.T. Energetic particle abundances in impulsive solar flare events. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1994, vol. 90, pp. 649–667.

Reames D.V. Solar energetic particles: A paradigm shift. *Rev. Geophys.* 1995, vol. 33, no. S1, pp. 585–589. DOI: [10.1029/95RG00188](https://doi.org/10.1029/95RG00188).

Reames D.E. Energetic particles composition. *Solar and galactic composition: A Joint SOHO/ACE Workshop*. Bern, Switzerland, 6–9 March, 2001 (AIP Conf. Proc.) 2001, vol. 598, pp. 153–164.

Reames D.V., Ng C.K. Heavy-element abundances in solar energetic particle events. *Astrophys. J.* 2004, vol. 610, no. 1, pp. 510–522. DOI: [10.1086/421518](https://doi.org/10.1086/421518).

Reames D.V. The two sources of solar energetic particles. *Space Sci. Rev.* 2013, vol. 175, no. 1, pp. 53–92. DOI: [10.1007/s11214-013-9958-9](https://doi.org/10.1007/s11214-013-9958-9).

Reames D.V. Element abundances in solar energetic particles and the solar corona. *Solar Phys.* 2014, vol. 289, no. 3, pp. 977–993. DOI: [10.1007/s11207-013-0350-4](https://doi.org/10.1007/s11207-013-0350-4).

Roth I., Temerin M. Selective ion acceleration in impulsive solar flares. *Adv. Space Res.* 1998, vol. 21, pp. 591–595.

Somov B.V. *Plasma Astrophysics: Reconnection and Flares*. Springer: New York. 2013. 504 p. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00968-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00968-X).

Tomozov V.M. FIP effect as an indicator of dynamic processes in the solar atmosphere and interplanetary medium. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2012, iss. 19, pp. 19–35. (In Russian).

Tomozov V.M. On some regularities in chemical composition distribution in stellar atmospheres. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2013, iss. 23, pp. 23–32. (In Russian).

Tomozov V.M., Strokin N.A. Comparative analysis of effectiveness of proton and electron acceleration in laboratory and solar plasma. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2015, vol. 55, no. 2, pp. 161–167. (In Russian). DOI: [10.7868/S0016794015020169](https://doi.org/10.7868/S0016794015020169).

Torsti J., Kocharov L., Innes D.E., Laivola J., Sahla T. Injection of energetic protons during solar eruption on 1999 May 9: Effect of flare and coronal mass ejection. *Astron. Astrophys.* 2001, vol. 365, pp. 198–203. DOI: [10.1051/0004-6361:20000148](https://doi.org/10.1051/0004-6361:20000148).

Tylka A.J., Cohen C.M.S., Dietrich W.F., Lee M.A., MacLennan C.G., Mewaldt R.A., Ng C.K., Reames D.V. Shock geometry, seed populations and the origin of variable elemental composition at high energies in large gradual solar particle events. *Astrophys. J.* 2005, vol. 625, no. 1, pp. 474–495. DOI: [10.1086/429384](https://doi.org/10.1086/429384).

Wang Y.-M., Pick M., Mason G.M. Coronal holes, jets and the origin of ³He-rich particle events. *Astrophys. J.* 2006, vol. 639, no. 1, pp. 495–509. DOI: [10.1086/499355](https://doi.org/10.1086/499355).

Yermolaev Yu.I., Yermolaev M.Yu. Solar and interplanetary sources of geomagnetic storms: space weather aspects. *Geophys. Processes and Biosphere*. 2009, vol. 8, no. 1, pp. 5–35. (In Russian).

Yutian Chi, Chenglong Shen, Yuming Wang, Pinzhong Ye, Wang S. Statistical Study of the Interplanetary Coronal Mass Ejections from 1996 to 2014. *arXiv: 1504.07849v1* [astro-ph.SR] 29 Apr 2015 P.1–9.

Zeldovich M.A., Ishkov V.N., Logachev Yu.I., Kechkemeti K. Ion composition of low-energy particle fluxes at 1 a.u. during quiet period of solar activity. *31 Vserossiiskaya konferentsiya po kosmicheskim lucham* [31st National Conference on Cosmic Rays]. Moscow, MSU, 2010, pp. 1–7. (In Russian).

Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Kundu M.R., White S.M. On the temporal relationship between coronal mass ejections and flares. *Astrophys. J.* 2001, vol. 559, no. 1, pp. 452–462. DOI: [10.1086/322405](https://doi.org/10.1086/322405).

Zurbuchen T.H., Weberg M., von Steiger R., Mewaldt R.A., Lepri S.T., Antiochos S.K. Composition of coronal mass ejections. *Astrophys. J.* 2016, vol. 826, no. 10, 8 p. DOI: [10.3847/0004-637X/826/1/10](https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/10).

URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ftpbrowser/flux_spectr_m.html (accessed 18.10.2017).

URL: <http://www.srl.caltech.edu/sampex/Data-Center/DATA/EventSpectra> (accessed 18.10.2017).

URL: <https://wind.nasa.gov/fullcatalogue.php> (accessed 18.10.2017).

Как цитировать эту статью

Минасянц Г.С., Минасянц Т.М., Томозов В.М. Поведение отношения Fe/O как показателя состояния солнечной плазмы при различных проявлениях активности и в периоды ее отсутствия. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 1. С. 33–58. DOI: [10.12737/stp-41201804](https://doi.org/10.12737/stp-41201804).