

УДК 523.9

СТАТИСТИКА СОЛНЕЧНЫХ ДЖЕТОВ ВУФ-ДИАПАЗОНА

© 2025 г. И. П. Лобода*, С. А. Богачёв, А. С. Кириченко,
А. А. Рева, А. С. Ульянов

Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

*e-mail: ivan.loboda@cosmos.ru

Поступила в редакцию 04.03.2024 г.

После доработки 12.08.2024 г.

Принята к публикации 12.08.2024 г.

Струеобразные выбросы вещества, иначе называемые джетами, в большом количестве наблюдаются в хромосфере и нижней короне, и представляют значительный интерес с точки зрения их возможной роли в переносе вещества и энергии в атмосфере Солнца. При этом наблюдается несколько групп солнечных джетов, вероятно, имеющих различный механизм формирования и существенно различающихся по своим характеристикам. С целью выделения отдельных групп джетов и отождествления их с различными физическими механизмами, в настоящей работе проводится статистическое исследование полного ансамбля джетов, наблюдавшихся в диапазоне вакуумного ультрафиолета (ВУФ) при помощи *Обсерватории Солнечной Динамики (SDO)* в каналах 171, 193 и 304 Å. Всего было зарегистрировано 212 событий, из которых 26 % отнесены к подмножеству линейных джетов, с вероятным механизмом ускорения магнитоакустическими ударными волнами, и 30 % – к подмножеству спиральных, представляющих собой выбросы мелкомасштабных филаментов. Показано, что указанные группы джетов существенно отличаются по своим основным динамическим характеристикам (высота подъёма, начальная скорость движения и время жизни), а также по ширине, связанной с исходной структурой магнитного поля; при этом спиральные джеты также значительно чаще ассоциированы с наличием горячей корональной компоненты. В то же время, обнаруживается третий класс джетов, имеющий промежуточные характеристики, механизм формирования которых остаётся неясным и требует дальнейшего изучения.

DOI: 10.31857/S0023420625010042, EDN: HEFSTI

1. ВВЕДЕНИЕ

В хромосфере и нижней короне Солнца наблюдается большое число сравнительно мелкомасштабных транзиентных явлений, известных под общим названием солнечных джетов и представляющих собой быстрые струеобразные направленные потоки вещества, поднимающиеся над фотосферой [1]. Соответственно, солнечные джеты традиционно вызывают значительный исследовательский интерес с точки зрения их возможной роли в процессах переноса массы и энергии в солнечной атмосфере, однако до сих пор остаётся немало вопросов касательно их детального вклада в эти процессы, а также собственного механизма формирования [2, 3].

Солнечные джеты наблюдаются повсеместно, как в активных областях, так и в областях спокойного Солнца и корональных дырах, значительно

различаясь при этом по масштабу, структуре и динамике. В то же время их изучение во многом усложняется тем, что солнечные джеты обладают значительным разнообразием, как по своим размерам и динамическим характеристикам (рис. 1), так и по температуре и, соответственно, наблюдаются в разных спектральных диапазонах. Вследствие этого возникает сложность в отождествлении структур, наблюдавшихся во множестве спектральных каналов с помощью различных инструментов [4, 5]. При этом, само определение солнечных джетов и их отдельных подвидов остается достаточно широким и связано в первую очередь с видимыми на изображениях Солнца морфологическими структурами без привязки к конкретным физическим механизмам. Таким образом, под это определение потенциально попадает широкий класс процессов в атмосфере Солнца, имеющих, вероятно, различную физическую природу и механизм формирования.

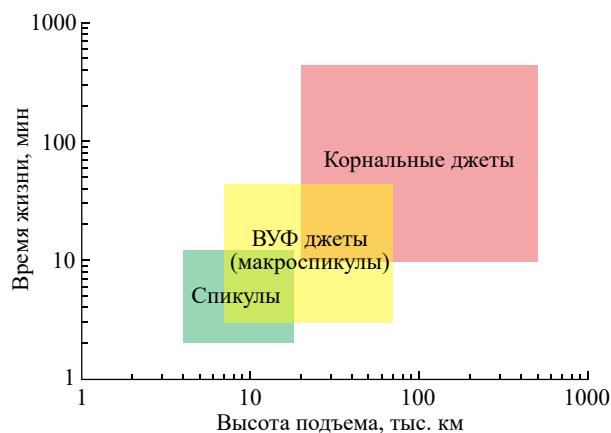


Рис. 1. Различие основных типов солнечных джетов по высоте подъема и времени жизни

Среди основных групп солнечных джетов наиболее мелкомасштабной и в то же время многочисленной разновидностью являются хромосферные спикалы, имеющие характерные продольные размеры 4–18 тыс. км, поперечные – от 300 до 2500 км, и время жизни в диапазоне 2–12 мин. При этом вещество спикал является по своим характеристикам преимущественно хромосферным, имеет температуру 7000 до 16000 К и плотность в диапазоне $4 \cdot 10^{10}$ – 10^{12} см⁻³. Скорость их движения сравнительно невелика и составляет 20–60 км/с [6]. Вероятным механизмом формирования спикал считается вынос хромосферного вещества ударными магнитоакустическими волнами, образующимися при переходе фотосферных звуковых колебаний через резкую (в терминах градиента плотности) границу хромосфера и короны [7, 8].

На противоположном конце спектра находятся значительно более крупные корональные джеты, наблюдаемые преимущественно на рентгеновских изображениях Солнца, что обусловлено высокой температурой их вещества от $4 \cdot 10^5$ до $2.8 \cdot 10^7$ К, в то время как плотность корональных джетов существенно ниже и составляет порядка $7 \cdot 10^8$ – $5 \cdot 10^{10}$ см⁻³. Характерное время жизни корональных джетов находится в диапазоне от 10 мин до 7 ч и более, скорость – от 90 до 1100 км/с, высота подъема составляет порядка 20–500 тыс. км, а ширина – около 6–10 тыс. км [9]. При этом сравнительно недавно был выделен особый подкласс корональных джетов – так называемые джеты-выбросы (blowout jets), для которых характерно спиралевидное движение вещества вокруг центральной оси джета,

порождаемое эruptionью мелкомасштабного волокна (минифиламента) в результате пересоединения удерживавшей его скрученной магнитной трубки с окружающей, преимущественно униполярной, структурой магнитного поля [10]. При такого рода джетах часто имеют существенную более холодную компоненту, которая хорошо видна в спектральных линиях вакуумного ультрафиолета (ВУФ) [11].

Промежуточное положение между хромосферными спикалами и корональными джетами, как по пространственному и временному масштабу, так и по характерной температуре плазмы, занимают джеты, наблюдаемые в ВУФ-диапазоне. Исторически подобные джеты называются макроспикалами в связи с тем, что на первых ВУФ-изображениях солнца, полученных космической обсерваторией *Skylab* и имевших сравнительно невысокое угловое разрешение, они были идентифицированы как хромосферные спикалы, имеющие, однако, существенно больший размер [12]. Таким образом, данный термин отражает в первую очередь визуальное сходство джетов ВУФ-диапазона со спикалами без привязки к конкретной структуре и вероятному механизму формирования, который остается достоверно не установленным. Часто макроспикалами называются любые джеты, наблюдаемые в линиях ВУФ, безотносительно их морфологической структуры, что еще больше размывает значение данного термина и усложняет идентификацию джетов.

Также, имеются основания полагать, что по крайней мере часть из наименее крупных ВУФ-джетов действительно представляют собой горячую компоненту наиболее масштабных хромосферных спикал [13, 5]. Ранее авторами было выделено подмножество джетов ВУФ-диапазона, представляющих собой узкие, коллимированные выбросы вещества, которые в контексте настоящей работы удобно называть линейными. Характерная особенность динамики таких джетов – параболические (т.е. имеющие квадратичную зависимость от времени) профили движения их вершин, не являющиеся, однако, баллистическими и, по всей видимости, возникающие в результате ускорения вещества в соответствии с линейным профилем скорости восходящей магнитоакустической ударной волны аналогично механизму формирования хромосферных спикал более мелкого масштаба [14, 15]. Соответственно, можно говорить, что именно данная разновидность джетов ВУФ-диапазона больше всего заслуживает наименования макроспикал.

Джеты ВУФ-диапазона, также как и солнечные джеты в целом, обладают широким разбросом наблюдаемых характеристик. В частности, как уже отмечалось выше, наиболее крупные из них часто идентифицируются с холодными компонентами рентгеновских джетов-выбросов [11]. Соответственно, можно выделить по крайней мере два существенно различных механизма формирования джетов, наблюдавшихся в ВУФ-диапазоне: один связан с эruptionью минифиламентов, сопровождающейся существенной перестройкой исходной структуры магнитного поля, другой формируется в результате чисто гидродинамического процесса, в котором роль магнитного поля остается преимущественно пассивной. В результате возникает вопрос об исследовании границы между этими двумя группами джетов и их взаимного отношения – можно ли однозначно разделить эти группы по наблюдаемым характеристикам, и может ли подобное разделение описать все множество джетов, наблюдавшихся в ВУФ.

Для ответа на данный вопрос необходимо масштабное статистическое исследование, в котором одинаково хорошо будут представлены все группы джетов, наблюдавшиеся в ВУФ-диапазоне. В литературе как правило представлены лишь отдельные наблюдения таких джетов, часто побочные к наблюдениям других явлений солнечной активности, а единичные попытки статистического исследования этой разновидности солнечных джетов во всех случаях были существенно ограничены критериями отбора событий для упрощения их идентификации и измерения характеристик [16, 17]. Настоящее исследование направлено на изучение всей популяции солнечных джетов, наблюдавшихся в ВУФ-диапазоне, с целью унифицированной регистрации и измерения характеристик наблюдавшихся за лимбом событий и выделения всех существующих групп джетов для установления механизмов их формирования и взаимного отношения.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Наилучшую возможность для подобных статистических исследований в настоящее время предоставляет комплекс телескопов AIA *Обсерватории Солнечной Динамики (SDO)*, проводящей регулярные наблюдения диска и нижней короны Солнца в 7 узких спектральных каналах ВУФ-диапазона [18]. Отличительной особенностью этих наблюдений является их высокое пространственное (1.2 угл. сек, или около 870 км) и временное (от 6 с) разрешение при непрерывно

наблюдаемом полном диске Солнца в поле зрения 41×41 угл. мин.

Для надежной и однозначной идентификации джетов удобнее всего использовать залимбовую область изображений. В настоящем исследовании для идентификации отдельных событий используется канал 304 Å, в котором доминирует линия переходного слоя He II 304 Å, высвечивающая тонкую границу между, как правило, более холодным веществом внутри джета и корональным веществом снаружи. Важно отметить, что за лимбом существенный вклад в этот канал дает также корональная линия иона Si XI, что затрудняет идентификацию тусклых структур за лимбом. Для ее устранения была использована полуэмпирическая модель, предложенная в работе [19].

Для исследования “горячей” (корональной) и “холодной” (хромосферной) компонент джетов дополнительно использовались наблюдения AIA в каналах 171 и 193 Å. В этих каналах может наблюдаваться как горячее вещество джета, видимое в излучении, если его дифференциальная мера эмиссии (ДМЭ) становится сравнимой с ДМЭ спокойной короны по лучу зрения, так и холодное, хромосферное вещество, включающее значительное количество нейтрального водорода, и, видимое в поглощении вследствие его фотоионизации, а также за счет отсутствия коронального вещества в соответствующей области пространства. Соответственно, подобные наблюдения можно интерпретировать либо как признак нагрева части вещества джета за счет мелкомасштабного пересоединения магнитосиловых линий, либо как наличие в составе джета концентрации плотного холодного вещества, обычно – выбрасываемого минифиламента. Помимо этого, в каналах 171 и 193 Å была проведена независимая идентификация событий, не показавшая, однако, наличия джетов, не зарегистрированных в канале 304 Å. Пример одновременного наблюдения джета ВУФ-диапазона в указанных спектральных каналах представлен на рис. 2.

Для исследования было выбрано 4 трехчасовых интервала с 9:00 до 12:00 UT, каждый 14 мая с 2010 по 2014 г., в которых шаг наблюдений AIA по времени во всех используемых спектральных каналах был равномерным и составлял 12 с. Несмотря на то, что *SDO* продолжает работу до настоящего момента, более поздние периоды наблюдения не рассматривались из-за существенной деградации канала 304 Å [20], которая существенно снизила эффективность и, главное, единообразие регистрации джетов за лимбом. На соответствующих изображениях была выделена

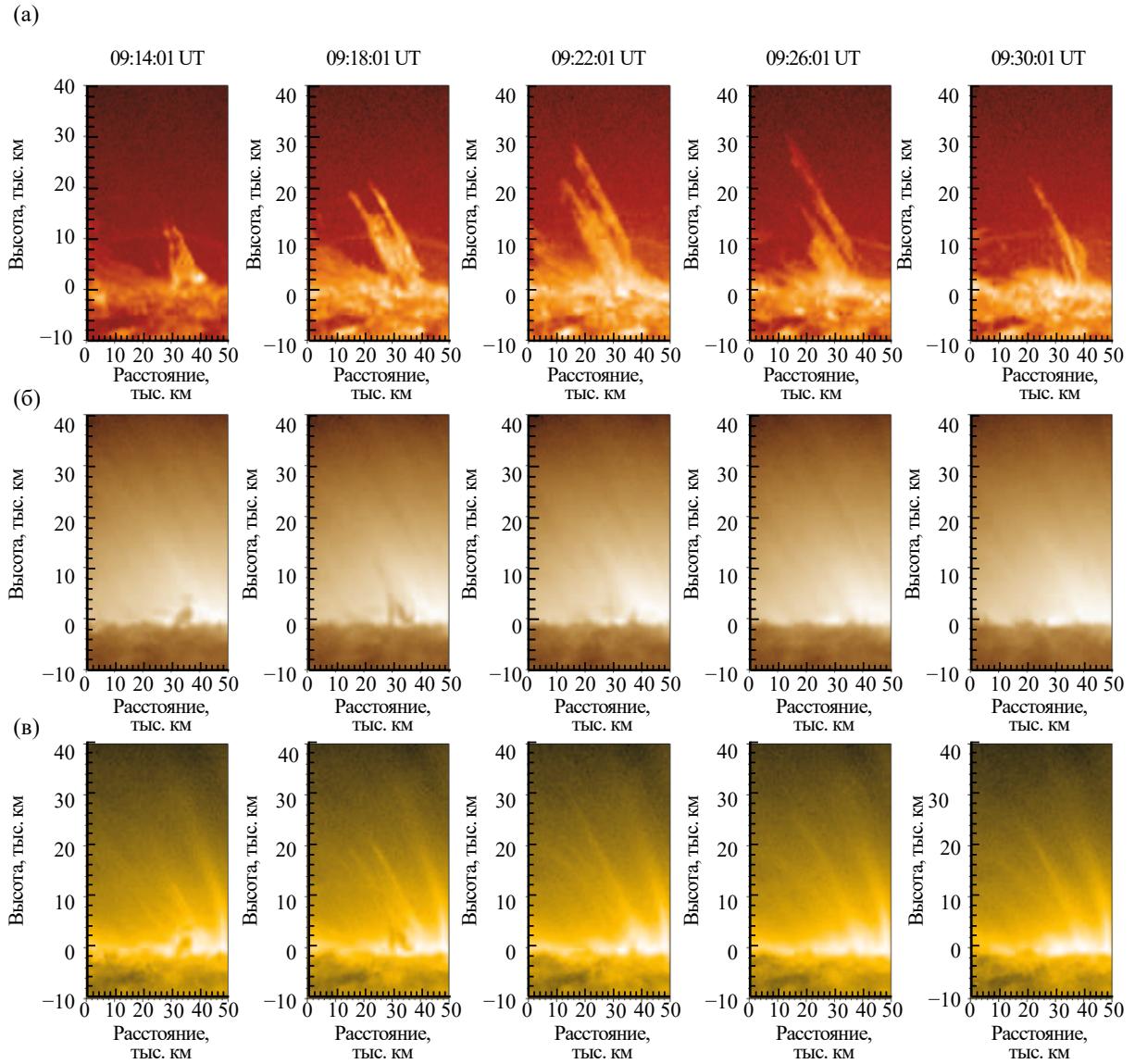


Рис. 2. Пример наблюдений джета-выброса, сформированного эruptionей минифиламента, в каналах 304 Å (а), 171 Å (б) и 193 Å (в) *SDO/AIA*. В каналах 171 и 193 Å (б, в) видно движение холодного вещества минифиламента на начальной стадии движения джета, в то время как в канале 193 Å (в) одновременно виден выброс горячего коронального вещества

залимбовая область, находящаяся от 10 тыс. км ниже лимба до 80 тыс. км над ним, достаточная для наблюдения оснований и полной длины ВУФ-джетов. При этом исключались области, занятые крупномасштабными явлениями активности — активными областями и протуберанцами. Для удобства обработки данных производилось полярное преобразование указанной области, после чего из отдельных изображений составлялись трехмерные массивы (кубы данных)

$$D[\phi, h, t] = \frac{1}{\Delta t} I_t [(R + h) \cos \phi - x_0, (R + h) \sin \phi - y_0],$$

где $I_t[x, y]$ — исходное изображение, полученное в момент времени t ; Δt — время экспозиции; x_0 и y_0 — координаты центра Солнца на изображении; R и h — радиус Солнца и высота над лимбом; ϕ — полярный угол, отсчитываемый от северного полюса Солнца; при этом шаг интерполяции по ϕ и h выбирался в соответствии с угловым разрешением AIA. Последующая обработка подготовленных таким образом наблюдательных данных производилась в полуавтоматическом режиме.

Для надежной регистрации всех наблюдаемых событий за лимбом использовались

синоптические карты на различных высотах h_s , представляющие собой срезы $S[\phi, t] = D[\phi, h_s, t]$. Для сканирования по высоте, а также идентификации и каталогизации отдельных событий на таких картах, был разработан графический интерфейс, позволяющий за короткое время обрабатывать большое количество наблюдательных данных, и, соответственно, набирать статистически значимую выборку событий. После выделения с помощью таких карт области $C = D[\phi_1 : \phi_2, h, t_1 : t_2]$, изолирующей каждое событие по времени и положению на лимбе, строилась карта наибольших по времени интенсивностей $M[\phi, h] = \max C[\phi, h, t]$. Это позволило с хорошей точностью обозначить ось джета и магнитосиловую трубку, в которой заключено его вещество в течение всего наблюдаемого времени жизни, даже в случае интенсивных внутренних движений вещества джета в ходе его развития. Таким образом определялось положение оси джета и ее наклон к нормали, а также ширина самого джета; положение джета на лимбе регистрировалось как точка пересечения его оси с видимым лимбом Солнца.

После этого для изучения продольной динамики движения вещества джета строились пространственно-временные карты, полученные путём усреднения наблюдаемой интенсивности по горизонтальным слоям в пределах магнитосиловой трубы, заключающей в себе вещество джета:

$$T[h, t] = \frac{1}{2\Delta\phi} \sum_{\phi_a - \Delta\phi}^{\phi_a + \Delta\phi} C[\phi, h, t],$$

где $\phi_a = \phi_a(h)$ – положение оси джета; $2\Delta\phi$ – его ширина. Из-за относительно слабой интенсивности излучения джетов по сравнению с излучением спокойной короны было необходимо дополнительное повысить контраст наблюдений. Для этого перед усреднением интенсивности производилось вычитание медианного по времени сигнала в соответствующем спектральном канале, вычисленного в каждой точке короны (ϕ, h) для полного периода наблюдений. С помощью таких пространственно-временных карт измерялись другие основные характеристики джета – высота его подъема, начальная скорость движения и наблюданное время жизни, характеризующие общую динамику движения вещества джета вдоль его оси.

Поскольку данное исследование было направлено на статистическое, по возможности наиболее единообразное изучения всего ансамбля ВУФ-джетов, а не на детальное изучение отдельных явлений, регистрировались только указанные выше основные параметры,

характеризующие пространственный масштаб и динамику джетов. Для отождествления наблюдаемых событий с основными известными механизмами формирования, отдельно регистрировалось наличие параболических (по времени) профилей движения вершины джета при общем коллимированном характере движения его вещества – как индикатор механизма ускорения при помощи ударных волн, – и наличие осевого, спиралевидного вращения джета одновременно с выбросом минифиламента в его основании. Соответственно, такие джеты классифицировались как джеты-выбросы. Из-за слабого наблюдаемого поглощения и излучения джетов в “горячих” каналах 171 и 193 Å их динамика в этих каналах не исследовалась детально, регистрировалось только наличие в пределах магнитосиловой трубы джета значимого по сравнению с шумами фонового сигнала снижения или усиления излучения в этих каналах.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В течение выбранного периода наблюдений было идентифицировано 212 отдельных событий, 65% из которых наблюдались в области спокойного солнца и 35% – в корональных дырах. При этом широтное распределение имеет выраженный пик вблизи полюсов (рис. 3а) за счет большей концентрации джетов в корональных дырах, явившихся в исследованный период преимущественно полярными. Таким образом, несмотря на меньшее абсолютное число зарегистрированных событий, темп появления джетов всех возможных классов существенно выше в корональных дырах, что компенсирует сравнительно малую площадь последних относительно областей спокойного Солнца. При этом наклон оси всех зарегистрированных джетов находился, как правило, в пределах $\pm 40^\circ$, что указывает на их связь с преимущественно вертикальной, униполярной конфигурацией магнитного поля вблизи фотосферных концентраций магнитного потока. Помимо этого, полученные данные подтвердили наличие существенной разницы в высоте подъема джетов, наблюдавшихся в корональных дырах и на спокойном солнце (рис. 4б), аналогично обнаруженной ранее зависимости для спикул и макроспикул [8, 21]. При этом данная закономерность одинакова для всех типов зарегистрированных событий, что говорит о равной роли для развития различных классов ВУФ-джетов преимущественно униполярной конфигурации магнитного поля и меньшего гидродинамического

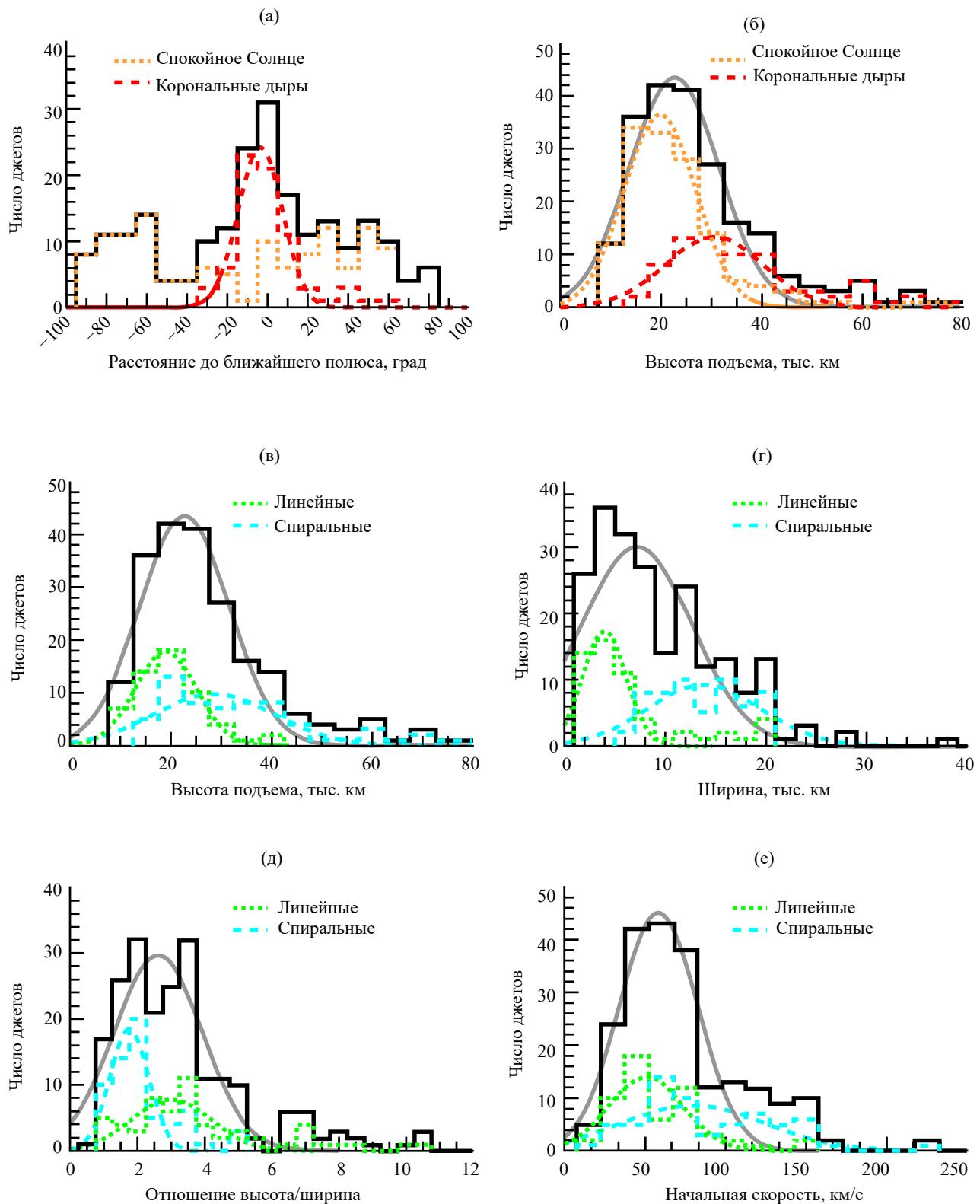


Рис. 3. Распределение основных измеренных характеристик солнечных джетов ВУФ-диапазона. Отдельно показаны джеты, зарегистрированные в областях спокойного солнца и в корональных дырах (а, б), линейные и спиральные джеты (в-ж) и джеты, имевшие заметное поглощение или излучение в каналах 171 и 193 Å (з-к)

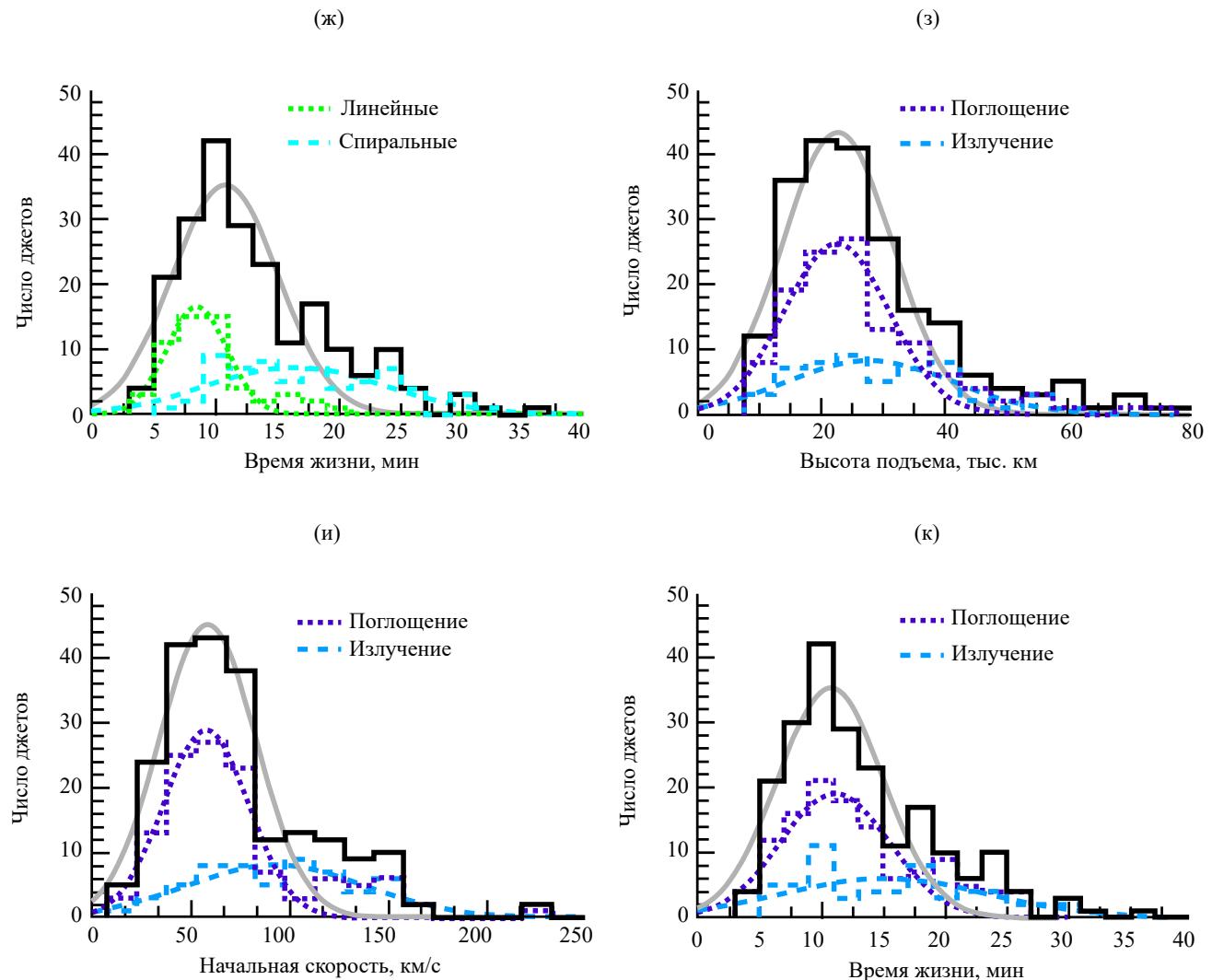


Рис. 3. Окончание

сопротивления окружающей плазмы, характерных для корональных дыр.

Из всех наблюдавшихся событий 56 джетов (26% от общего числа) были идентифицированы как линейные и 63 (30%) как спиральные, причём только 56 из них (26% от общего числа) были ассоциированы с наблюдавшимся выбросом мелкомасштабного минифиламента в их основании, что позволяет дополнительно идентифицировать такие события как джеты-выбросы. При сравнении характеристик двух основных популяций джетов ВУФ-диапазона, приведенных также в таблице, линейные джеты имеют заметно меньшую среднюю высоту подъёма – 19 против 29 тыс. км (рис. 4в), ширину магнитной трубы – 4 против 14 тыс. км

(рис. 4г), и при этом существенно большее отношение высоты и ширины джета (рис. 4д), т.е. указанные выше различия не являются следствием одного лишь пропорционального увеличения масштаба джета. Таким образом, линейные джеты – не только менее масштабны, но и гораздо более узкие, коллимированные структуры, что в целом соответствует чисто гидродинамическому характеру движения вещества в магнитной трубке, которая может быть в общем случае сколь угодно узкой, в то время как для джетов-выбросов ширина магнитной трубы принципиально ограничена снизу размером начальной структуры выбрасываемого минифиламента. Последнее обстоятельство также находит отражение в полученных распределениях: наименьшая ширина зарегистрированных

Таблица. Основные измеренные характеристики джетов ВУФ-диапазона, их линейных и спиральных подгрупп (указаны наиболее характерные значения)

Характеристика	Все джеты	Линейные джеты	Сpirальные джеты
Высота подъема, тыс. км	22.7	18.9	28.6
Ширина, тыс. км	7.2	4.0	13.9
Отношение высота/ширина	2.6	3.0	1.8
Начальная скорость, км/с	58.3	50.4	80.0
Время жизни, мин.	10.8	8.4	16.5
Доля от общего числа, %	—	26.4	29.7
Видимость в поглощении, %	57.1	60.7	71.4
Видимость в излучении, %	28.3	10.7	41.3

спиральных джетов составляет 8 тыс. км, что существенно больше не только минимальной, но и средней ширины линейных джетов.

При сравнении динамических характеристик спиральные джеты также обладают существенно большими характерными значениями – их средняя начальная скорость составляет около 80 км/с против 50 км/с для линейных джетов (рис. 3е), следствием чего, в свою очередь, является заметно большее время жизни таких джетов – 16.5 против 8.5 мин (рис. 3ж); что в целом характеризует их как более крупные и энергичные явления активности. Можно отметить, что все полученные распределения для спиральных джетов являются существенно более широкими, чем для линейных, что говорит об их большей вариативности, по всей видимости, обусловленной более сложным механизмом формирования, определяющимся большим количеством внешних факторов и начальных условий. Важным обстоятельством является то, что оставшиеся 45 % из наблюдавшихся джетов нельзя было однозначно отнести ни к одному из указанных выше основных классов по их динамическим и морфологическим характеристикам, при этом по своим основным параметрам, характеризующим их масштаб и общую энергетику, такие джеты занимают промежуточное положение между этими классами.

При исследовании сигнала в “горячих” каналах АIA было обнаружено, что 61 % линейных джетов был виден в поглощении в одном из таких каналов, и только 11 % – в излучении относительно фона невозмущенной короны. Напротив, среди спиральных джетов 71 % был виден в излучении, и 41 % – в поглощении, что говорит о несколько большей суммарной по лучу зрения плотности хромосферного вещества в таких джетах, а также существенно более интенсивном

нагреве вещества до корональных температур. Наиболее вероятным источником такого нагрева может служить процесс мелкомасштабного магнитного пересоединения, по всей видимости участвующий в формировании спиральных джетов. В целом, в канале 171 Å 60 джетов (28 % от общего числа) были видны в излучении, и 98 джетов (46 %) – в поглощении, в то время как в канале 193 Å, отвечающего более высокой температуре излучающей плазмы, 24 джета (11 %) были видны в излучении, и 115 (54 %) – в поглощении. Это может говорить о том, что несмотря на вероятный нагрев вещества в значительной части наблюдаемых джетов, его интенсивность может быть достаточна для достижения корональных температур только у наиболее крупных, энергичных событий, с большей вероятностью относящихся к классу спиральных джетов. Также было показано, что в целом, джеты, видимые в излучении (и, таким образом, ассоциированные с нагревом существенной доли их вещества до корональных температур), имеют лишь незначительно большие высоты подъема по сравнению с джетами, видимыми в поглощении (соответственно, представляющими собой преимущественно потоки холодного вещества; рис. 3з). Последние, однако, характеризуются существенно меньшими скоростями движения (рис. 3и) и временем жизни (рис. 3к), что подтверждает связь общей динамики и энергетики джета с интенсивностью процессов энерговыделения и нагрева плазмы в нем.

Помимо распределений, была также исследована взаимосвязь измеренных характеристик, показавшая наличие существенных корреляций между рядом основных параметров для всех типов джетов. В первую очередь можно отметить выраженную взаимозависимость высоты

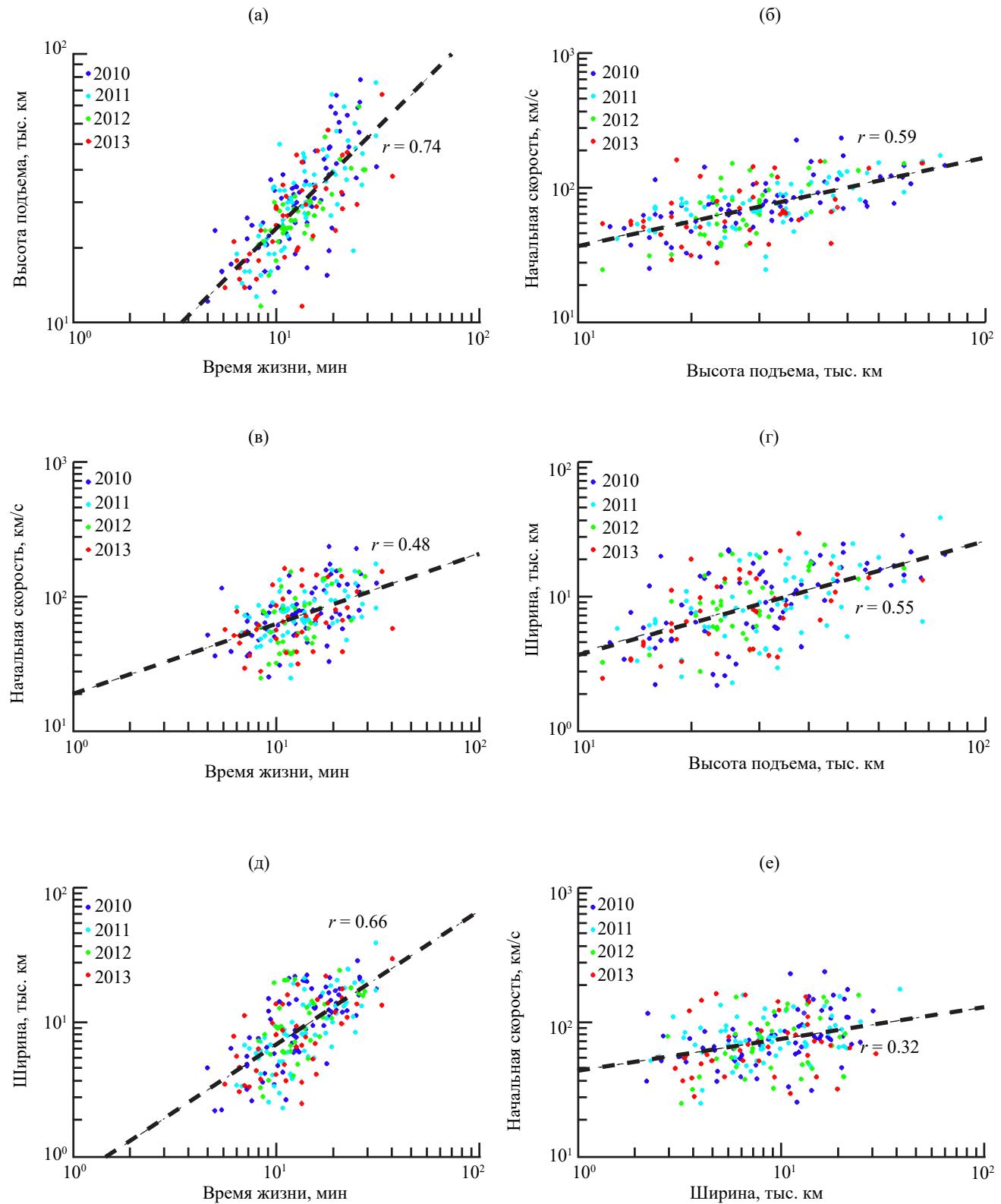


Рис. 4. Наиболее сильные корреляции измеренных характеристик джетов. Цветом показаны годы наблюдения. Штриховыми линиями показаны линейные аппроксимации вместе с соответствующими значениями коэффициента корреляции

подъема, начальной скорости движения и времени жизни джетов (рис. 4а–в), которую можно было бы объяснить эффектами подобия при изменении масштабов наблюдаемых событий. Помимо этого, однако, была обнаружена сильная корреляция высоты подъема и времени жизни джетов с их шириной (рис. 4г, д), и несколько менее выраженная – между шириной и начальной скоростью движения джетов (рис. 4е). Наличие таких корреляций еще раз подчеркивает роль исходной магнитной структуры в преобладающем механизме формирования и общей энергетике джета. Помимо этого, в работе не было зарегистрировано заметной вариации наблюдаемых характеристик джетов с течением солнечного цикла как в плане распределения этих величин, так и с точки зрения их корреляций.

Наконец, при рассмотрении подгруппы спиральных джетов, с точки зрения физического механизма представляющих собой выбросы минифиламентов, интересно сопоставить их с семейством более крупных волокон или протуберанцев, наблюдающихся в большом количестве практически повсеместно на диске или за лимбом, соответственно. Для этой цели был использован массив наблюдений, полученный по данным ВУФ-телескопов ТЕСИС космической обсерватории *КОРОНАС-Фотон* в канале 304 Å и включающий в себя около 400

преимущественно мелкомасштабных спокойных и спокойно-эруптивных протуберанцев [22]. По этим данным была обнаружена связь между временем жизни протуберанцев и рядом иных характеристик, отражающих их масштаб, такими как видимая проекционная площадь, а также полученными в работе оценками объема, массы и гравитационной энергии протуберанцев. При этом наблюдавшийся спектр этих характеристик свидетельствовал о росте числа протуберанцев с уменьшением соответствующего масштаба, что свидетельствовало о вероятном наличии большого числа более мелкомасштабных структур при его экстраполяции в область меньших значений.

Таким образом можно ожидать, что аналогичная закономерность должна обнаруживаться для подгруппы спиральных джетов, наблюдавшихся в настоящей работе. Для оценки массово-энергетических характеристик джетов-выбросов была использована та же оценочная модель, что и в работе [22], при этом для возможности сопоставления результатов была проведена взаимная калибровка интенсивности в каналах 304 Å телескопов АIA и ТЕСИС, отдельно для каждого периода наблюдений, рассматриваемых в настоящей работе, для учета существенной деградации со временем канала 304 Å комплекса АIA. Несмотря на то, что число достоверно зарегистрированных джетов-выбросов было недостаточно

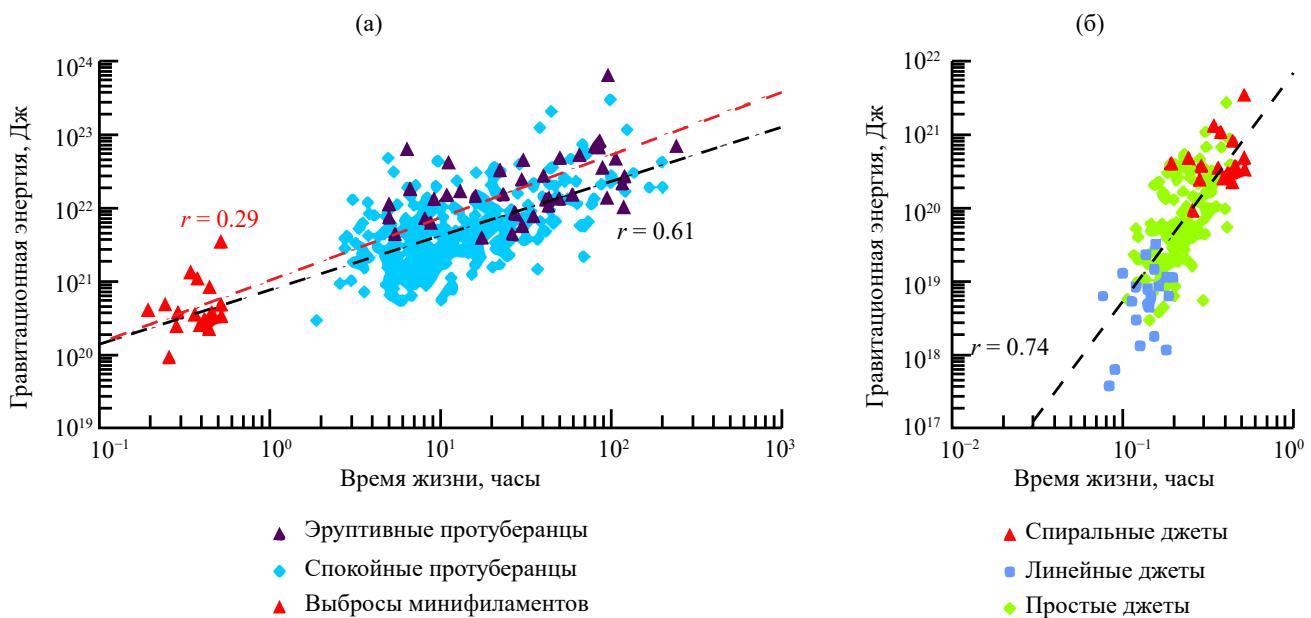


Рис. 5. Взаимозависимость времени жизни и масштаба, выраженного средней гравитационной энергией, для протуберанцев и джетов-выбросов (а), а также для различных групп джетов (б). Штриховыми линиями показаны линейные аппроксимации: красным – для джетов-выбросов, черным – для протуберанцев (а) и всех видов ВУФ-джетов (б)

для формирования статистически-значимой выборки, для них действительно обнаруживается аналогичная зависимость между масштабом события и его временем жизни, хоть и с весьма низким значением коэффициента корреляции (рис. 5а). Более того, зарегистрированные джеты-выбросы с хорошей точностью продолжают зависимость, наблюдавшуюся для более крупных протуберанцев. Стоит отметить, что подобное прямое сравнение может быть не вполне корректно, поскольку в настоящей работе наблюдается лишь вещество выброса, а не находящийся в его основании минифиламент, и регистрируется только время видимого движения за лимбом сформировавшегося в результате джета. Вероятно, настолько хорошее соответствие может быть объяснено эффектами подобия, а также тем, что для менее масштабных структур длительность выброса может быть сравнима со временем жизни самого минифиламента.

В то же время, если рассматривать зависимость “время жизни – масштаб” для всего множества исследованных джетов, обнаруживается схожая закономерность, имеющая, однако, существенно отличный показатель степени от вышеописанной (рис. 5б). При этом джеты, идентифицированные как линейные, занимают область наименьших масштабов, а спиральные джеты-выбросы, напротив, имеют наибольшие значения времени жизни и энергии, в то время как значительная часть зарегистрированных джетов, не принадлежащая ни к одной из основных групп, представляет собой постепенный переход от одной группы к другой. Это ещё раз указывает на наличие важной, переходной, разновидности джетов ВУФ-диапазона с неясным пока механизмом формирования, без детального изучения которой, в первую очередь с точки зрения понимания их физической природы, невозможно полное описание всего множества солнечных джетов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено статистическое исследование всей популяции солнечных джетов, наблюдавшихся в ВУФ-диапазоне, с целью выделения различных групп, различающихся по механизму формирования. Показано, что линейные джеты, для которых наиболее вероятным является механизм ускорения вещества ударной волной, и спиральные, представляющие собой выбросы минифиламентов, существенно отличаются по своим основным пространственным и динамическим характеристикам, в первую

очередь – по ширине, что говорит о важности исходной топологии магнитной структуры при формировании указанных групп джетов. При этом показано наличие промежуточной группы джетов – переходной по своим характеристикам между линейными и спиральными, для которой вероятный механизм формирования остаётся неустановленным. Таким образом, требуется дальнейшее, более подробное изучение данного подмножества джетов ВУФ-диапазона с целью установления их физической природы и взаимного отношения с другими видами солнечных джетов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российской научного фонда (проект № 21-72-10157).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shen Y.* Observation and modelling of solar jets // Proc. the Royal Society A. 2021. V. 477. Iss. 2246. Art. ID20200217. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0217>.
2. *De Pontieu B., McIntosh S.W., Carlsson M. et al.* The origins of hot plasma in the solar corona // Science. 2011. V. 331. Iss. 6013. P. 55–58. <https://doi.org/10.1126/science.1197738>.
3. *Loboda I.P., Bogachev S.A.* Plasma dynamics in solar macrospicules from high-cadence extreme-UV observations // Astron. Astrophys. 2017. V. 597. Iss A78.0. P. 1963–1980. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527559>.
4. *Wang H.* Comparison of H α and He II λ 304 Macrospicules // The Astrophysical J. 1998. V. 509. Iss. 1. Art.ID461. <https://doi.org/10.1086/306497>.
5. *Skogsrud H., Rouppe van der Voort L., De Pontieu B. et al.* On the temporal evolution of spicules observed with IRIS, SDO, and Hinode // The Astrophysical J. 2015. V. 806. Iss. 2. Art.ID170. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/2/170>.
6. *Sterling A.C.* Solar spicules: a review of recent models and targets for future observations // Solar Physics. 2000. V. 196. P. 79–111. <https://doi.org/10.1023/A:1005213923962>.
7. *De Pontieu B., McIntosh S., Hansteen V.H. et al.* A tale of two spicules: the impact of spicules on the magnetic chromosphere // Publications of the Astronomical Society of Japan. 2007. V. 59. Iss. sp3. P. S655-S652. <https://doi.org/10.1093/pasj/59.sp3.S655>.

8. Pereira T.M.D., De Pontieu B., Carlsson M. Quantifying spicules // *The Astrophysical J.* 2012. V. 759. Iss. 1. Art.ID18. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/759/1/18>.
9. Raouafi N.E., Patsourakos S., Pariat E. et al. Solar coronal jets: observations, theory, and modeling // *Space Science Reviews*. 2016. V. 201. Art.ID1–53. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0260-5>.
10. Moore R.L., Cirtain J.W., Sterling A.C. et al. Dichotomy of solar coronal jets: standard jets and blowout jets // *The Astrophysical J.* 2010. V. 720. Iss. 1. Art.ID757. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/720/1/757>.
11. Moore R.L., Sterling A.C., Falconer D.A. et al. The cool component and the dichotomy, lateral expansion, and axial rotation of solar X-ray jets // *The Astrophysical J.* 2013. V. 769. Iss. 2. Art.ID134. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/769/2/134>.
12. Bohlin J.D., Vogel S.N., Purcell J.D. et al. A newly observed solar feature-Macrospicules in He II 304 Å // *Astrophysical J.* 1975. V. 197. Pt. 2. P. L133–L135. <https://doi.org/10.1086/181794>.
13. Pereira T.M.D., De Pontieu B., Carlsson M. et al. An interface region imaging spectrograph first view on solar spicules // *The Astrophysical J. Letters*. 2014. V. 792. Iss. 1. Art.ID L15. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/792/1/L15>.
14. Loboda I.P., Bogachev S.A. What is a Macrospicule? // *Astrophys. J.* 2019. V. 871. Iss. 2. Art.ID230. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aafa7a>.
15. Loboda I.P., Bogachev S.A. A statistical study of linear jets in the low solar corona // *Astronomical and Astrophysical Transactions*. 2019. V. 31. Iss. 2. P. 199–208.
16. Bennett S.M., Erdélyi R. On the statistics of macrospicules // *The Astrophysical J.* 2015. V. 808. Iss. 2. Art. ID135. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/808/2/135>.
17. Kiss T.S., Gyenge N., Erdélyi R. Systematic variations of macrospicule properties observed by SDO/AIA over half a decade // *The Astrophysical J.* 2017. V. 835. Iss. 1. Art.ID47. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa5272>.
18. Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J. et al. The atmospheric imaging assembly (AIA) on the solar dynamics observatory (SDO) // *Solar Physics*. 2012. V. 275. P. 17–40. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9776-8>.
19. Loboda I., Reva A., Bogachev S. et al. Separating He II and Si XI Emission Components in Off-limb 304 Å Observations // *Solar Physics*. 2023. V. 298. Iss. 11. Art.ID136. <https://doi.org/10.1007/s11207-023-02230-6>.
20. Boerner P.F., Testa P., Warren H. et al. Photometric and thermal cross-calibration of solar EUV instruments // *Solar Physics*. 2014. V. 289. P. 2377–2397. <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0452-z>.
21. Bogachev S.A., Loboda I.P., Reva A.A. et al. Difference in the Characteristics of Solar Macrosopicules at Low and High Latitudes // *Astron. Lett.* 2022. V. 48. Iss. 1. P. 47–54. <https://doi.org/10.1134/S1063773722010029>.
22. Loboda I.P., Bogachev S.A. Quiescent and eruptive prominences at solar minimum: a statistical study via an automated tracking system // *Solar Physics*. 2015. V. 29. <https://doi.org/10.1007/s11207-015-0735-7>.

STATISTICS OF SOLAR EUV JETS

© 2025 I. P. Loboda*, S. A. Bogachev, A. S. Kirichenko,
A. A. Reva, A. S. Ulyanov

Space Research Institute, Moscow, Russia

*e-mail: ivan.loboda@cosmos.ru

Collimated ejecta of matter, otherwise known as jets, are observed in large numbers in the chromosphere and lower corona of the Sun, and are of great interest in relation to their possible role for the transport of matter and energy in the solar atmosphere. These jets are subdivided into several groups characterized by different formation mechanisms and substantial variation of their characteristics. In order to distinguish separate groups of jets and identify them with respective formation mechanisms, we performed a statistical study of the full ensemble of solar extreme ultraviolet (EUV) jets using observations from the Solar Dynamics Observatory (SDO) in the 171, 193, and 304 Å channels. We identified a total of 212 such events, of which 26 % were classified as linear jets, probably generated by magnetoacoustic shocks, and 30 % as helical jets, representing small-scale filament eruptions. We found that these two groups differ significantly in their major dynamic characteristics (maximum height, initial velocity, and lifetime), as well as in their widths that are closely related to the underlying magnetic field structure, while helical jets were also shown to be much more frequently associated with the presence of hot coronal component. At the same time, we found a third class of jets with intermediate characteristics and unknown formation mechanism, requiring further study.