

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Пояс корональных стримеров и два последних минимума активности на СолнцеГ. А. Порфирьева^a, Г. В. Якунина^b, А. Б. Делоне*Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).**Россия, 119991, Москва, Университетский просп., д. 13**E-mail: ^agalina-porfirieva@yandex.ru, ^byakunina@sai.msu.ru*

Статья поступила 30.04.2010, подписана в печать 18.06.2010

На основе наблюдений с борта орбитальной солнечной станции SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) и с борта обсерватории по исследованию солнечно-земных связей STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) анализируется структура пояса стримеров и динамика выбросов вещества в периоды двух последних минимумов солнечной активности 1996–1997 и 2006–2009 гг. Выявляются определенные особенности в характеристиках пояса стримеров в последнем минимуме между 23-м и 24-м циклами по сравнению с предыдущим минимумом между 22-м и 23-м циклами солнечной активности. Рассматривается связь фотосферной активности и секторной структуры глобального магнитного поля Солнца с топологией и динамикой пояса стримеров. Кратко обсуждаются модели, объясняющие наблюдаемые явления. Используются данные, опубликованные в научных журналах и Интернете.

Ключевые слова: Солнце, корона, стримеры, выбросы вещества, солнечный цикл.

УДК: 523.98. PACS: 96.60.gd, 96.60.pf, 96.60.ph.

Введение

Цикл солнечной активности проявляется в различных явлениях, таких, как, например, процесс пятнообразования, радиоизлучение в сантиметровом диапазоне, эволюция корональных дыр, динамика солнечной короны. Стримеры представляют собой основные крупномасштабные структуры солнечной короны. Они состоят из серии закрытых петель, расположенной внутри оболочки открытых магнитных линий, и имеют шлемовидную форму. Стримеры возникают вдоль линии раздела крупномасштабных фотосферных магнитных полей разной полярности в активных областях, спокойном Солнце или вдоль канала волокна.

В период минимума солнечной активности (СА), когда общее магнитное поле на поверхности источника (поверхность, условно принимаемая сферической, с радиусом $2.4 R_s$, разделяет внутренне замкнутое поле и радиально направленное внешнее открытое поле) хорошо описывается полем диполя, система стримеров располагается вблизи солнечного экватора вдоль линии раздела глобального магнитного поля Солнца. Она окаймляет Солнце и образует так называемый пояс стримеров. Форма токового слоя достаточно плоская. В период максимума солнечной активности магнитная структура сложная. Корональные стримеры могут возникать почти на любой широте и видны везде вокруг солнечного лимба. Токовый слой, разделяющий магнитные поля разной полярности, образует гофрированную поверхность. Предполагается, что корональные стримеры являются источниками медленного солнечного ветра. Солнечная плазма ускользает в межпланетное пространство вдоль открытых силовых линий магнитного поля, окружающих пояс стримеров.

Период предыдущего минимума для 22–23 циклов солнечных пятен наблюдался с последней четверти

1995 до середины 1997 г. Последний цикл обладал некоторыми особенностями по сравнению с предыдущим циклом [1, 2] и оказался самым длительным за последнее столетие. Минимум между 23-м и 24-м циклами, предсказанный на 2006–2007 гг., затянулся и продолжался в 2008–2009 гг. В настоящей работе ставилось целью проанализировать структуру пояса стримеров и динамику плазмы, выбрасываемой из стримеров, в периоды последних двух минимумов солнечной активности.

1. Пояс стримеров и солнечная активность

Схематическое изображение простого стримера приведено на рис. 1. Внутренняя полость стримера, называемая ядром, обычно менее плотная по сравнению с внешними слоями. В ее верхней части петельные структуры имеют заостренную в виде каспа форму. Вокруг токового слоя над каспом существует достаточно плотный тонкий слой плазмы, простирающийся

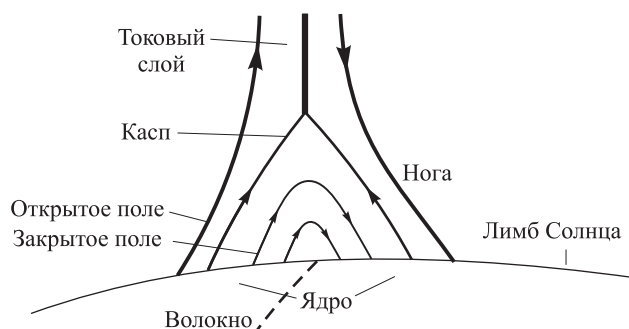


Рис. 1. Схематическое изображение структуры стримера

на большие расстояния от лимба Солнца и называемый корональным лучом, образуемым сужающимися над каспом магнитными силовыми линиями внешней оболочки.

Как можно видеть из изображений солнечной короны, полученных из космоса в 1997 и 1999 гг. или с Земли во время солнечных затмений 2006 и 2008 гг. (см. рис. 1 в [3], рис. 1–3 в [4], рис. 3, а в [5]) в период, близкий к максимуму солнечной активности (1999 г.), корональные стримеры располагаются повсюду вокруг солнечного диска, в минимуме СА (1997 г.) — в узкой полосе вблизи солнечного экватора, а в последнем минимуме СА (2007–2009 гг.) пояс стримеров занимал большую область по позиционным углам.

Вид пояса стримеров в период солнечного минимума хорошо описывается моделью, в которой принимается, что рассеивающие электроны сконцентрированы вокруг достаточно плоского токового слоя, окружающего Солнце приблизительно вдоль экватора. Концентрация электронов в поясе стримеров в 1996 г. для кэррингтоновского оборота CR 1913, рассчитанная на основе карт фотосферного магнитного поля, представлена на рис. 6 в [6]. Токовый слой тонкий и имеет плоскую, слегка изогнутую форму.

В минимуме СА 1996 г. на изображениях, полученных в поляризованном свете, обнаруживаются яркие узкие структуры с характерной шириной меньше $3\text{--}5^\circ$. Пояс стримеров обладает тонкой структурой и имеет джетоподобный вид, если он виден сбоку, и состоит из нескольких лучей, если токовый слой волнообразный и виден наклонным к лучу зрения. Различные структуры, видимые в поясе стримеров, отчетливо показаны на рис. 1 в [7], где на основе наблюдений в белом свете на коронографах C2 и C3 LASCO (Large Angle Spectrometric Coronagraph) SOHO проанализирована эволюция пояса стримеров для CR 1908–1913 за период с 8 апреля по 18 сентября 1996 г. На рис. 5 [7] показано изменение структуры пояса стримеров в течение нескольких месяцев в 1996 г. в виде долготно-широтных карт. Видно, что у восточного лимба Солнца пояс стримеров остается узким, а у западного лимба ширина пояса постепенно увеличивается со временем. Это означает, что в течение кэррингтоновских оборотов CR 1908–1910 (с апреля по июнь) поверхность пояса стримеров остается достаточно плоской, а начиная с июля структура изменяется, становясь все более изогнутой. Образуются разрывы, появляется тонкая структура. Ширина пояса стримеров все более увеличивается к CR 1913. Изменения происходили над низкоширотным комплексом активности, расположенным на кэррингтоновской долготе 255° , который виден на картах фотосферного магнитного поля, полученных по наблюдениям на обсерватории WSO (Wilcox Solar Observatory) и национальной солнечной обсерватории NSO (National Solar Observatory) в Кит-Пик.

Начальное всплытие активной области (АО) в течение CR 1909 не вызвало какого-либо изменения в топологии пояса стримеров. Во время CR 1911 вблизи широты 23° N появился второй магнитный поток, и пояс стримеров начал деформироваться [7]. Рассмотрение эволюции пояса стримеров с апреля по сентябрь 1996 г. и сравнение с картами магнитного поля показало,

что влияние фотосферной активности на топологию пояса стримеров зависит не только от напряженности всплывающего магнитного потока, но также и от его фазы по долготе по отношению к фоновому полю. Если последовательность ведущей и хвостовой полярностей всплывающего магнитного потока такая же, как в фоновом поле (в долготном направлении), то эти два поля находятся в фазе друг с другом, в противном случае поля находятся в противофазе.

Если магнитное поле АО и фоновое поле находятся в фазе, то форма пояса стримеров становится волнистой и имеет большую широтную протяженность (CR 1913), чем когда магнитное поле всплывает в противофазе по отношению к фоновому полю. Это заключение, вытекающее из наблюдений, было подтверждено модельными расчетами, выполненными в [7] для интенсивности пояса стримеров на гелиоцентрическом расстоянии $3R_s$ в период минимума солнечной активности в 1996 г.

В течение CR 1909 магнитное поле низкоширотной АО и глобальное магнитное поле находились в противофазе и пояс стримеров оставался плоским. Модельный расчет интенсивности пояса стримеров для случая измененной на противоположную по сравнению с наблюдаемой последовательности полярностей для комплекса активности показывает более возмущенную структуру пояса стримеров, по сравнению с реально наблюдаемой, как раз на долготе 255° . На протяжении CR 1913 глобальное магнитное поле и магнитное поле АО находились в фазе друг с другом и пояс стримеров имел волнообразную форму [7, 8].

2. Наблюдения пояса стримеров с борта STEREO

Начиная с 2006 г. наблюдения из космоса с борта космической обсерватории STEREO, состоящей из двух отдельных станций А и В, позволили увидеть пояс стримеров в белом свете одновременно сбоку и с поверхности. Имея изображения, зарегистрированные одновременно с двух разнесенных в пространстве космических станций, можно получить более реальные значения скоростей плазмы. На каждой станции (STEREO/A и STEREO/B) установлены два коронографа COR1 и COR2 с полем зрения $1.3\text{--}4.0R_s$ и $2\text{--}15R_s$ соответственно. В работе [9] пояс стримеров исследовался на основе наблюдений с борта STEREO в течение нескольких месяцев 2008 г. Станции А и В расходятся со скоростью $\sim 45^\circ$ в год и в июне 2008 г. были разделены друг от друга на 56° . Как показывают карты фотосферного магнитного поля Солнца и карты интенсивности пояса стримеров на гелиоцентрическом расстоянии $3R_s$, в 2008 г. структура пояса стримеров в течение нескольких кэррингтоновских оборотов изменялась незначительно.

В период минимума солнечной активности пояс стримеров обычно ограничен узкой областью вблизи экватора, как это было 12–13 лет назад в 1997 г. В 2008 г. пояс стримеров имел волнообразный вид и большую протяженность по широте на долготу 270° , где, согласно картам фотосферного магнитного поля обсерватории NSO, в течение нескольких месяцев существовала АО. На протяжении 18–19 июня 2008 г. были получены серии изображений одновременно на коронографах COR2 А и COR2 В, когда три облака

плазмы типа «blobs», выброшенные из стримеров, двигались через поле зрения. На изображениях, зарегистрированных на COR2 В, облака, наблюдаемые сбоку, имели форму, подобную вилке с двумя зубцами. Серии облаков, видимые на COR2 А сверху, появлялись как последовательности больших арок, причем каждая арка имела свой азимут.

Наблюдения в белом свете при помощи широкоугольных коронографов C2 и C3 LASCO с борта обсерватории SOHO обнаружили выбросы сгустков плазмы из корональных стримеров и позволили определить их скорости в проекции на плоскость неба. Эти многочисленные выбросы, происходящие несколько раз в день в период минимума солнечной активности и с большей частотой при активном Солнце, и представляют собой так называемые сгустки типа «blobs». Они являются облаками плазмы, выбрасываемыми из Солнца вдоль оси стримера, становятся видимыми на гелиоцентрических расстояниях $3-4R_s$ и занимают $\sim 1R_s$ в длину и $\sim 0.1R_s$ в ширину. По мере удаления от Солнца их размеры увеличиваются. Интенсивность этих образований составляет только около 7–10% от интенсивности стримера, с которым они связаны. Поскольку выбрасываемые облака вещества более плотные по сравнению с окружающей короной, они могут служить трассерами медленного солнечного ветра, так как их движение связано со скоростью солнечного ветра, а траектории движения можно проследить.

Интенсивность белой короны быстро уменьшается с гелиоцентрическим расстоянием r . Исследуемые события представляются слабыми по своей яркости. Для увеличения контраста изображения используется специальный метод разностных изображений. Чтобы выделить движущееся образование, из изображения, полученного в данный момент, вычитается изображение, соответствующее какому-то предыдущему моменту времени. Результирующие изображения называются «бегущими» разностными изображениями. Движущийся объект выглядит подобно «биполярному» образованию с белым пятном, предшествующим темному в направлении движения облака. Интенсивность увеличивается в местах, где плотность вещества больше в данный момент времени, и уменьшается там, где плотность становится меньше (см. рис. 3 в [10]).

На основе этих разностных изображений строятся карты. Из разностных изображений, полученных при помощи LASCO C2 и C3 SOHO, вырезаются радиальные полоски шириной около 10° , центрированные вдоль оси стримера, и выстраиваются вертикально друг за другом во временной последовательности, образуя карту высота–время, на которой вдоль оси X отложено время, а вдоль оси Y гелиоцентрическое расстояние. Этот метод предложил Уолтерс [11]. На картах видны отчетливые треки (см. рис. 6 в [3], рис. 2 в [12]). Анализируя такие треки, можно вычислить скорости и ускорения движущегося образования в зависимости от гелиоцентрического расстояния. В действительности таким методом мы получаем только составляющую полной скорости в картинной плоскости. Однако события, траектории которых сильно отклоняются от картинной плоскости, не видны из-за своей малой интенсивности.

Выброс стримера представляет собой особый класс корональных событий, когда в результате магнитного пересоединения вблизи Солнца стример внезапно разрывается и происходит его отделение с последующим выбросом в межпланетное пространство. Благодаря магнитному натяжению силовые линии, расположенные ниже точки пересоединения, втягиваются назад к Солнцу [12, 13], а сам стример отделяется и выбрасывается в межпланетное пространство. В работе [12] исследовался выброс стримера, наблюдавшийся 1–2 июля 2006 г. на солнечном лимбе в N-W квадранте на телескопе EIT (Extreme Ultraviolet Imaging Telescope), дающем изображения диска Солнца и нижней короны в далекой ультрафиолетовой области спектра, и коронографе LASCO SOHO, позволяющем получать изображения солнечной короны в белом свете на далеких расстояниях вплоть до $30R_s$. По мере удаления от Солнца скорость увеличилась от 20 до 500 км/с, максимальное ускорение составляло 12 м/с^2 .

3. Скорости выбросов вещества из стримеров

Мы систематизировали данные о скоростях плазмы в стримерах и сравнили динамику пояса стримеров в течение двух последних минимумов солнечной активности. Результаты представлены на рис. 2. Приводятся данные для 80 сгустков типа «blobs», наблюдавшихся в 1997 г. в белом свете на LASCO SOHO (●). Скорости в среднем увеличиваются от 50 км/с на $3-4R_s$ до 300 км/с на $20R_s$ и среднее ускорение порядка 4 м/с^2 . Средние скорости на расстояниях $1.7-5R_s$ вычислены по спектральным наблюдениям на UVCS (Ultraviolet Coronagraph Spectrometer) SOHO в 1997 г. (◇) [14]. Скорости стримера, выброшенного 1–2 июля 2006 г. и зарегистрированного на телескопе EIT и коронографе LASCO SOHO (○), прослежены вплоть до расстояния порядка $30R_s$ [12]. По данным [15] нами вычислены средние величины скоростей для 106 сгустков типа «blobs», наблюдавшихся за период с 14 февраля по 29 сентября 2007 г. на LASCO SOHO (+). Среднее ускорение составляло 6.8 м/с^2 . Скорости облаков плазмы, обнаруженных 18–19 июня

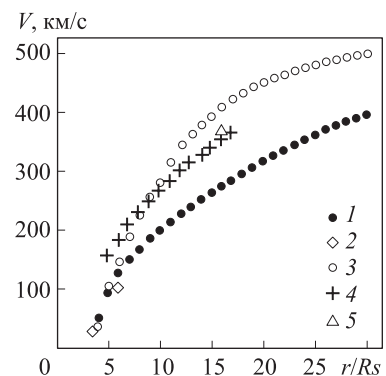


Рис. 2. Зависимость средних скоростей V выбросов вещества из стримеров от гелиоцентрического расстояния r для: 1 — 80 событий 1997 г., LASCO SOHO [3]; 2 — спектральных наблюдений 1997 г., UVCS SOHO [14]; 3 — выброса стримера 2006 г., EIT, LASCO SOHO [12]; 4 — 106 событий 2007 г., LASCO SOHO [15]; 5 — трех событий 2008 г., STEREO [9]; 1, 3–5 — белый свет, 2 — линии ионов O(VI)

2008 г. на COR2-A и COR2-B STEREO (Δ), варьируются в пределах от 300 до 400 км/с [9].

Разброс скоростей для сгустков типа «blobs» по наблюдениям 1996–1997 гг. лежит в пределах 150 км/с, а по наблюдениям в 2007 г. — в пределах 250 км/с. Возможно, такая разница в характере поведения скоростей вызвана изменчивостью в условиях возникновения сгустков плазмы типа «blobs» около Солнца. Большой разброс скоростей в 2007 г. по сравнению с разбросом в 1996–1997 гг. служит свидетельством повышенной солнечной активности в последнем минимуме 23–24 циклов. Скорости стримера, выбрасываемого как целое, больше, чем средняя скорость ограниченных объемов плазмы, подобных сгусткам плазмы типа «blobs», образующихся над каспами стримеров и покидающих Солнце. По-видимому, в событиях первого типа действует дополнительная движущая сила.

Заключение

В период минимума солнечной активности пояс стримеров обычно ограничен узкой областью около солнечного экватора, как это и наблюдалось в 1996–1997 гг. Во время последнего солнечного минимума в 2007–2009 гг. пояс стримеров имел волнообразную форму и большую протяженность по гелиографической широте. В 2008 г. события, подобные событиям 18–19 июня, наблюдались также в апреле, мае и октябре. Все они были видны со STEREO A как большие арки, занимающие большой диапазон углов по долготе [9]. Эти наблюдения можно объяснить, предположив, что пояс стримеров имел изогнутую форму. Пояс стримеров в апреле–июне 1996 г. был достаточно плоским.

Выбросы стримеров, подобные событию, наблюдавшемуся в июне 2006 г., случались во время минимумов в 1996 и 2008 гг., при этом пояс стримеров разрушается, но через некоторое время он обычно восстанавливается. Сгустки плазмы типа «blobs», покидающие Солнце из области над каспом, не разрушают структуру стримеров. По-видимому, выброс таких облаков плазмы имеет другое происхождение по сравнению с открытым стримером как целого. Полагают, что выброс сгустков плазмы типа «blobs» является результатом пересоединения магнитных линий, составляющих «ноги» стримера (рис. 1), с открытыми силовыми линиями окружающего магнитного поля.

Выброс стримера можно объяснить моделью, подобной модели «капающего крана», предложенной в [16], или моделью, предложенной Линкером [17], когда в какой-то момент времени давление плазмы начинает превосходить натяжение магнитного поля, в результате чего петли будут подниматься и вытягиваться. Основания вытянувшихся петель начнут сближаться и пересоединяться на расстояниях, близких к Солнцу $1.3\text{--}1.4R_s$, и объем плазмы стримера будет освобожден и оторвется от Солнца. Можно видеть внезапное разделение стримера на две компоненты: возвращающуюся к Солнцу со скоростью 100 км/с и выброшенную плазму, покидающую Солнце со скоростью 400–500 км/с [12, 18]. По-видимому, в 2006–2009 гг. пояс стримеров был более динамичным, чем в 1996–1997 гг. На гелиоцентрических расстояниях $3\text{--}15R_s$ во время последнего

минимума солнечной активности скорости выброшенной из стримеров плазмы были на несколько десятков (до сотни) км/с больше, чем в течение предыдущего минимума 1996 г.

Кажется, что разница в характере зависимостей скоростей выброса типа «blobs» от гелиоцентрического расстояния, полученных по наблюдениям в 1996–1997 и 2007–2008 гг., отражает реальные различия в динамике выбрасываемой плазмы. В [15] приведены данные о рекуррентных выбросах из 10 стримеров. В зависимости от конкретной ситуации из каждого стримера происходило от 9 до 10–13 выбросов в течение 3–4 суток (в среднем по 3–4 выброса в день). Всего было проанализировано 106 событий. Пояс стримеров располагался в приэкваториальной области, занимающей около 40° по широте. На приводимых в [15] картах треков (время–расстояние) и зависимостях скорость–расстояние видно, что из одного и того же стримера происходили выбросы с небольшой разницей по времени. Однако скорости следующих друг за другом выбросов могли отличаться в 1.5–2 раза. Например, это хорошо видно на рис. 1 на треках выбросов, наблюдавшихся в начале 13 июня и в середине 15 июня (случай A) [15].

На рис. 3 [10] приведены траектории выбросов, повторяющихся в течение 8 дней с 19 по 27 апреля 1997 г. из стримера на западном лимбе Солнца. Видно, что траектории выбросов носят более однообразный характер и не имеют таких заметных различий между собой, как это наблюдалось в 2007 г. Диаграмма скорости — гелиоцентрические расстояния для 10 наиболее четких случаев, приведенная на рис. 4 в [10], показывает разброс скоростей порядка 150 км/с, что согласуется с разбросом скоростей, полученным по наблюдениям 60 событий в 1996 г. [19].

Различие в скоростях сгустков плазмы, выбрасываемых из каспов стримеров отдельными порциями, согласно наблюдениям 1996–1997 и 2006–2009 гг., скорее всего вызвано тем, что в период последнего минимума солнечной активности уровень общей активности Солнца, в том числе и динамика пояса стримеров, был выше, пояс стримеров простирался до больших широт и гелиоцентрических расстояний.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-01033-а).

Список литературы

1. Ишков В.Н. // Сб. тезисов конференции «Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика 2009». 5–11 июля 2009 г. СПб., 2009. С. 58.
2. Просовецкий Д.В., Просовецкая Н.А. // Сб. трудов конференции «Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика 2009». 5–11 июля 2009 г. СПб., 2009. С. 363.
3. Wang Y.-M., Sheeley N.R. Jr., Socker D.J. et al. // J. Geophys. Res. 2000. **105**. P. 25133.
4. Wang Y.-M., Biersteker J.B., Sheeley N.R. Jr. et al. // Astrophys. J. 2007. **660**. P. 882.
5. Pasachoff J.M., Rusin V., Druckmüller M. et al. // Astrophys. J. 2009. **702**. P. 1297.
6. Saez F., Llebaria A., Lamy P., Vibert D. // Astron. Astrophys. 2007. **473**. P. 265.
7. Wang Y.-M., Sheeley N.R. Jr., Howard R.A. et al. // Astrophys. J. 1997. **485**. P. 875.

8. Saez F., Zhukov A.N., Lamy P., Llebaria A. // *Astron. Astrophys.* 2005. **442**. P. 351.
9. Sheeley N.R. Jr., Lee D.D.-H., Casto K.P. et al. // *Astrophys. J.* 2009. **694**. P. 1471.
10. Wang Y.-M., Sheeley N.R. Jr., Walters J.H. // *Astrophys. J.* 1998. **498**. P. L165.
11. Sheeley N.R. Jr., Walters J.H., Wang Y.-M., Howard R.A. // *J. Geophys. Res.* 1999. **104**. P. 24739.
12. Sheeley N.R. Jr., Warren H.P., Wang Y.-M. // *Astrophys. J.* 2007. **671**. P. 926.
13. Sheeley N.R. Jr., Wang Y.-M. // *Astrophys. J.* 2007. **655**. P. 1142.
14. Strachan L., Suleiman R., Panasyuk A.V. et al. // *Astrophys. J.* 2002. **571**. P. 1008.
15. Song H.Q., Chen Y., Liu K. et al. // *Solar Phys.* 2009. **258**. P. 129.
16. Hones E.W. Jr. // *Australian. J. Phys.* 1985. **38**. P. 981.
17. Linker J.A., Mikic Z. // *Astrophys. J.* 1995. **438**. P. L45.
18. Wang Y.-M., Sheeley N.R. Jr. // *Astrophys. J.* 2006. **650**. P. 1172.
19. Sheeley N.R. Jr., Wang Y.-M., Hawley S.H. et al. // *Astrophys. J.* 1997. **484**. P. 472.

Coronal streamer belt and two last minima of the activity on the Sun

G. A. Porfir'eva^a, G. V. Yakunina^b, A. B. Delone

P. K. Sternberg State Institute of Astronomy, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119191, Russia.
E-mail: ^agalina-porfirieva@yandex.ru, ^byakunina@sai.msu.ru.

Streamer belt structure and dynamics of matter ejections during the periods of the two last minima of the solar activity (1996–1997 and 2006–2009) are analyzed on the basis of the observations aboard the solar station SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) and from the space observatory STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory). Definite specialities in characteristics of the streamer belt exist in the last 23–24 cycles minimum in comparison with the previous 22–23 cycles minimum. Relation of the photospheric activity and sector structures of the general magnetic field of the Sun with the streamer belt topology and velocities of matter ejections are considered. Some models explaining the observed phenomena are briefly discussed. Data from scientific publications and Internet have been used.

Keywords: Sun, corona, streamers, matter ejections, solar cycle.

PACS: 96.60.gd, 96.60.pf, 96.60.ph.

Received 30 April 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2010).

Сведения об авторах

1. Порфирьева Галина Александровна — канд. физ.-мат. наук, научн. сотр.; тел.: (495) 939-19-73, e-mail: galina-porfirieva@yandex.ru.
2. Якунина Галина Валентиновна — науч. сотр.; тел.: (495) 939-19-73, e-mail: yakunina@sai.msu.ru.
3. Делоне Анна Борисовна — канд. физ.-мат. наук, научн. сотр., научн. сотр.; тел.: (495) 939-19-73.