

## ПРОЯВЛЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЖГУТОВ В СТРУКТУРЕ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТУБЕРАНЦЕВ

© 2023 г. Б. П. Филиппов\*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия*

*\*e-mail: bfilip@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 03.08.2022 г.

После доработки 05.10.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Вид спокойных солнечных протуберанцев чаще всего напоминает широкий занавес или изгородь из вертикального частокола. Трудно вообразить, что такая структура может быть связана или даже образована магнитным жгутом, пучком закрученных в цилиндрическую спираль силовых линий, который иногда наглядно проявляется в волокнах активных областей. Однако при сравнительно небольшой активизации протуберанцев, когда составляющая их плазма начинает двигаться вдоль силовых линий поля, структура магнитного жгута может быть различима. Показан пример спокойного протуберанца, в котором наблюдается вращательное движение вдоль спиральных траекторий, обрисовывающих жгут. Вращение хорошо видно на временной диаграмме, составленной из узких полосок изображений протуберанца вдоль траектории движения.

DOI: 10.31857/S001679402260048X, EDN: DLJCCU

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитный жгут, состоящий из винтовых силовых линий, считается одной из самых вероятных магнитных конфигураций в солнечной короне, способных накапливать и удерживать плотную плазму над поверхностью хромосферы, наблюдаемую как протуберанцы, или волокна при проекции на солнечный диск [Chen, 1989; Lin et al., 1998; Titov and Demoulin, 1999; Amari et al., 2000; Low, 2001; Kliem and Török, 2006; Zuccarello et al., 2012; Филиппов, 2019]. Скрученность в жгут тонких нитей, составляющих тело волокна, лучше видна в структуре волокон активных областей [Куликова и др., 1986; Rompolt, 1990; Vršnak et al., 1991; Chae, 2000; Filippov et al., 2015]. В спокойных волокнах и протуберанцах иногда тоже можно различить следы скрученности [Vršnak et al., 1993], но типичный вид спокойного солнечного протуберанца чаще всего напоминает широкий занавес или изгородь из вертикального частокола. Трудно вообразить, что такая структура может быть связана или даже образована магнитным жгутом, пучком винтообразно закрученных силовых линий.

Хотя измерения магнитного поля в солнечной короне сопряжены с большими трудностями и не проводятся на регулярной основе [Lin et al., 2000; Cargill, 2009; Yang et al., 2020], расчеты поля в короне по данным измерений фотосферного поля с

помощью различных моделей и приближений, а также измерения магнитного поля в протуберанцах свидетельствуют о доминировании энергии поля над тепловой и кинетической энергией корональной плазмы [Leroy, 1989; Gary, 2001; Wiegmann et al., 2014]. Поэтому плазма может свободно перемещаться вдоль магнитного поля и имеет препятствие в поперечном направлении. Филаментарная структура плазменных образований и траектории их движения, таким образом, отражают геометрию магнитного поля в короне. Однако вещество в спокойных протуберанцах чаще бывает малоподвижно. Оно сосредоточено в ямках силовых линий магнитного поля, которые имеются в жгуте ниже его продольной оси. Хотя особенности тонкой структуры волокна дают возможность судить об определенных свойствах магнитного жгута [Pevtsov et al., 2003; Martin et al., 2008], общий вид протуберанцев обычно мало напоминает скрученный жгут.

Вращательные движения были замечены во многих протуберанцах, но поначалу никак не связывались с возможным движением вдоль винтовых траекторий, а предполагались, что они свидетельствуют о вращении всей структуры целиком и о постоянном медленном пересоединении силовых линий [Liggett and Zirin, 1984]. С другой стороны, наблюдения различия доплеровских смещений спектральных линий внутри сечения протуберанца интерпретировались и как свиде-

тельство винтообразной структуры и макроскопических движений вдоль спиральных траекторий [Rompolt, 1975; Gigolashvili, 1978].

Некоторые небольшие протуберанцы, а скорее части более крупных протуберанцев, напоминают по виду вихри в земной атмосфере – торнадо. Такая форма протуберанцев была отмечена еще в наблюдениях в первой половине 20 века [Pettit, 1925]. Особый интерес к торнадо на Солнце возник после появления наблюдений в крайнем ультрафиолетовом диапазоне с высоким пространственным и временным разрешением. Ли и др. [Li et al., 2012] описали циклоническое вращение плазмы внутри корональной полости, окружающей протуберанец, предполагая, что наблюдаемое вращение демонстрирует движение вещества вдоль винтовой траектории, когда луч зрения направлен вдоль оси структуры. Чаще всего вращение отмечается в “ногах” спокойных протуберанцев [Orozco Suárez et al., 2012; Su et al., 2012; Panesar et al., 2013; Wedemeyer-Böhm et al., 2013]. Ось вращения в них вертикальна, и имеются предположения, что вращение инициировано движениями в фотосфере. Вместе с тем высказываются сомнения, что наблюдаемая картина в действительности демонстрирует вращение, а не колебательные движения и встречные потоки в соседних магнитных трубках – нитях внутренней структуры протуберанца [Panasenco et al., 2014].

В данной работе мы покажем очень наглядный пример, как движения в активизированном спокойном протуберанце выявляют структуру магнитного жгута, являющегося каркасом протуберанца. Движение плазмы будет продемонстрировано с помощью временной диаграммы, составленной из узких полосок изображений протуберанца вдоль траектории движения.

## 2. ВИНТООБРАЗНЫЕ ФОРМЫ ВОЛОКОН И ПРОТУБЕРАНЦЕВ

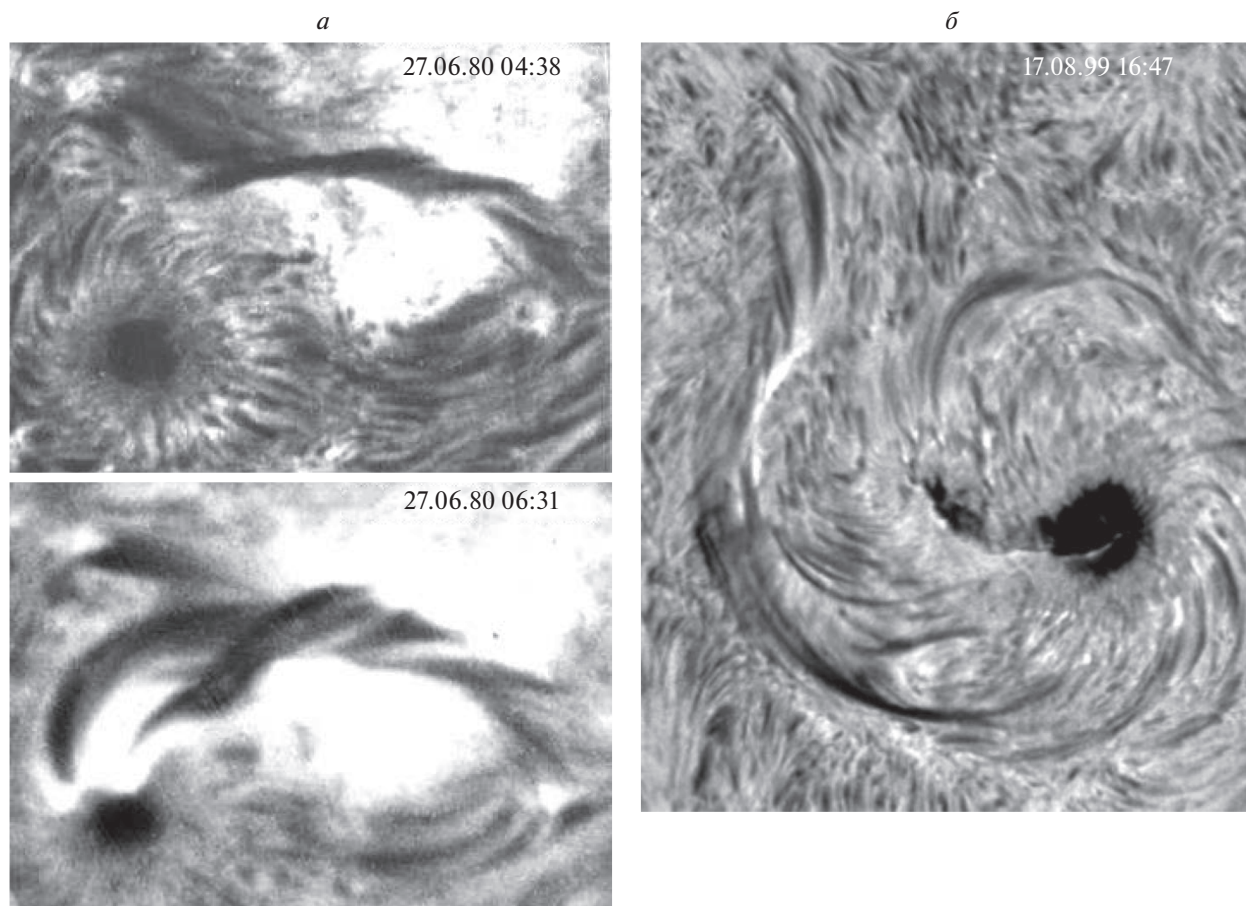
Горячая плазма солнечной короны, которая заполняет магнитные трубки в ней, имеет барометрическую шкалу высоты (~100 Мм), соизмеримую с характерным размером магнитных полей в короне. Поэтому плазменные структуры, наблюдаемые в спектральных линиях крайнего ультрафиолетового диапазона (петли, арочные структуры), заполняют магнитные трубки практически по всей их длине и дают наглядное представление о структуре магнитного поля в короне. Вещество солнечных протуберанцев холоднее коронального на два порядка, его барометрическая шкала высоты составляет менее 1 Мм, что существенно меньше масштаба магнитных полей в короне. Таким образом, отдельные магнитные трубки в протуберанцах заполнены неподвижным холодным веществом лишь на небольших отрезках, на которых трубки изгибаются не более чем на 1 Мм

вверх от самой нижней точки, образуя нити внутренней тонкой структуры волокон и протуберанцев. Длина нитей зависит от кривизны магнитных трубок и бывает значительной только в случае почти горизонтальных трубок или наличия движений внутри них.

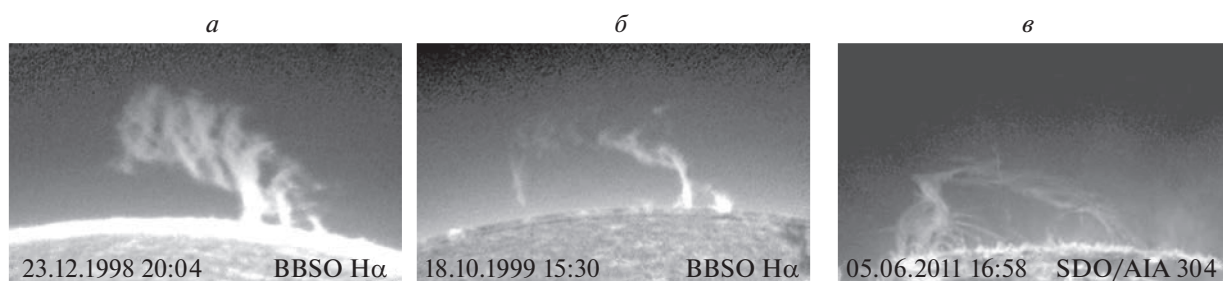
Согласно представлениям о структуре магнитных жгутов, образующих каркас протуберанцев, холодная плазма заполняет участки трубок в нижних частях жгута, ниже его продольной оси. В большинстве случаев тонкая структура волокон состоит из системы коротких отрезков нитей, направленных под острым углом к оси волокна [Lin et al., 2005; Martin et al., 2008]. Иногда, впрочем, нити имеют достаточную длину, чтобы винтовая форма трубок наглядно проявилась на изображениях как волокон активных областей (рис. 1), так и в структуре спокойных протуберанцев (рис. 2). В приведенных примерах использованы наблюдения в спектральной линии H $\alpha$  в Крымской астрофизической обс. (КрАО), Солнечной обсерватории Биг Бэр (BBSO), а также данные ультрафиолетовых телескопов AIA (Atmospheric Imaging Assembly [Lemen et al., 2012]) на борту космической обс. SDO (Solar Dynamic Observatory).

Наиболее отчетливо винтовая структура проявляется во время эрупции протуберанцев, когда движения становятся очень интенсивными. Вместе с тем высказываются сомнения, что жгуты существуют до начала эрупции, а не образуются во время нее в результате пересоединения силовых линий, не имевших ранее винтообразной формы [Gosling, 1999; Dere et al., 1999; Lynch et al., 2008]. Подобные воззрения, конечно, имеют под собой основание, поскольку во многих случаях признаков винтовых структур в протуберанце до эрупции не наблюдается. С другой стороны, имеются наблюдения, когда происходит лишь слабая активизация волокна, приводящая и интенсификации движений в нем и проявлению всей полной магнитной структуры, но эрупции не происходит, и волокно возвращается в прежнее состояние [Филиппов, 2011, 2017; Joshi et al., 2014; Yang et al., 2014; Wang et al., 2015].

На рисунке 3а показан вид волокна в спокойном состоянии, наблюдаемого в линии H $\alpha$  1 августа 2001 г. в 15:35 UT. В нем можно различить только отдельные короткие нити, повернутые на небольшой угол против часовой стрелки от продольной оси волокна. Примерно через три часа произошла активизация этого волокна, и вещество стало “переливаться” через верхнюю часть винтовых силовых линий слева направо (на рис. 3а). Появившиеся длинные нити, отклоняющиеся от оси по часовой стрелке, стали видны и в линии H $\alpha$ , но рельефнее проявились (рис. 3б) в наблюдениях в канале 171 Å космического телескопа TRACE (The Transition Region and Coronal Explorer



**Рис. 1.** Солнечные волокна активных областей с проявлением скрученности внутренней структуры, наблюдаемые в спектральной линии  $H\alpha$ . (а) – в Крымской астрофизической обс. (КраО), (б) – в Солнечной обс. Биг Бэр (BBSO).

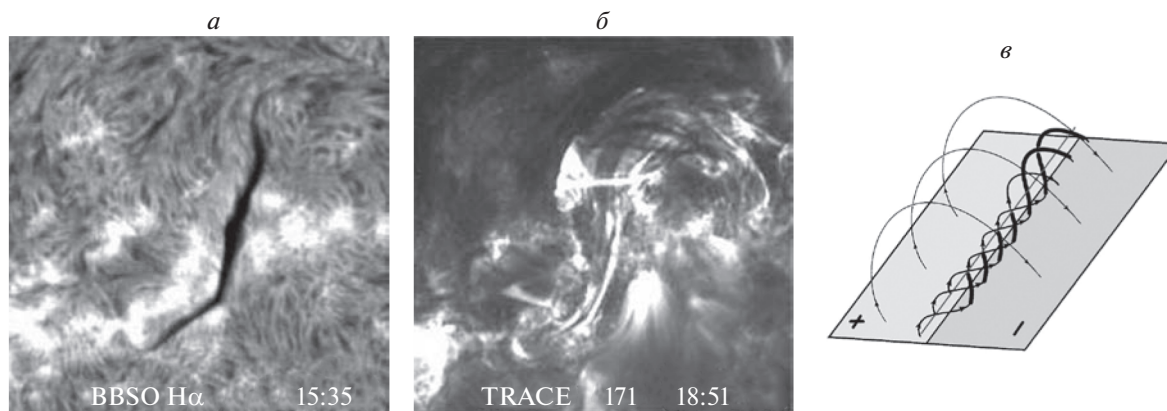


**Рис. 2.** Спокойные солнечные протуберанцы с проявлением скрученности внутренней структуры. Изображения повернуты на различные углы, чтобы участки лимба под протуберанцами были приблизительно горизонтальными. (а), (б) – наблюдения в линии  $H\alpha$  в Солнечной обс. Биг Бэр (BBSO), (в) – наблюдения в канале  $304 \text{ \AA}$  инструмента AIA (Atmospheric Imaging Assembly) на борту космической обс. SDO (Solar Dynamic Observatory).

[Handy et al., 1999]). Таким образом, волокно демонстрирует магнитную структуру, соответствующую правовинтовой цилиндрической спирали, как показано на схематическом рис. 3в. После активизации, проявившейся в интенсивных внутренних движениях с перетеканием вещества через верхние части спирали и продолжавшейся около 2 ч, волокно вернулось к спокойному состоянию, обретя в основном прежнюю форму.

### 3. ДВИЖЕНИЯ В ПРОТУБЕРАНЦАХ ПО ВИНТОВЫМ ТРАЕКТОРИЯМ

Винтовая структура протуберанцев может никак не проявляться на их изображениях на фильмограммах. Однако даже при умеренной активизации, движения внутри них, которые, как предполагается, направляются магнитным полем, способны выявить вращение, свидетельствующее



**Рис. 3.** Изменение вида волокна во время активизации 1 августа 2001 г. (а) –  $H\alpha$ -фильтрограмма в 15:35 UT (BBSO), (б) – вид той же области в 18:51 UT в канале 171 Å орбитального телескопа TRACE, (в) – схематические силовые линии магнитного жгута, содержащие первоначально плазму только в нижних частях волокна (утолщенные участки), а затем проникшую и в верхние участки спирали.

о наличии азимутальной компоненты поля. Винтовая структура на изображениях может быть и неразличима, но ее можно в ряде случаев идентифицировать по направлению вращения и продольного перемещения сгустков вещества протуберанца.

На рисунке 4 приведен пример активизации спокойного протуберанца южного полярного венца вблизи восточного лимба Солнца 4 марта 2022 г. в канале 193 Å SDO/AIA. На отдельных кадрах видно, что в протуберанце происходят заметные изменения его структуры, но распознать вращательное движение в нем можно только при просмотре временной последовательности изображений (фильма). Вращение происходит в направлении против часовой стрелки и наиболее различимо в период с 07 до 17 UT в той части протуберанца, которая достаточно высоко над лимбом. Около 13 UT отдельная прядь из вращающегося клубка сгустков вещества стала вытягиваться в западном направлении вдоль оси протуберанца, проецирующегося на диск Солнца, т.е. волокна (показана стрелкой на рис. 4к). Отсюда можно сделать вывод о том, что внутренняя структура протуберанца подобна правому винту. Это соответствует положительному знаку спиральности, характерному для южного полушария Солнца [Pevtsov et al., 2003; Martin et al., 2008].

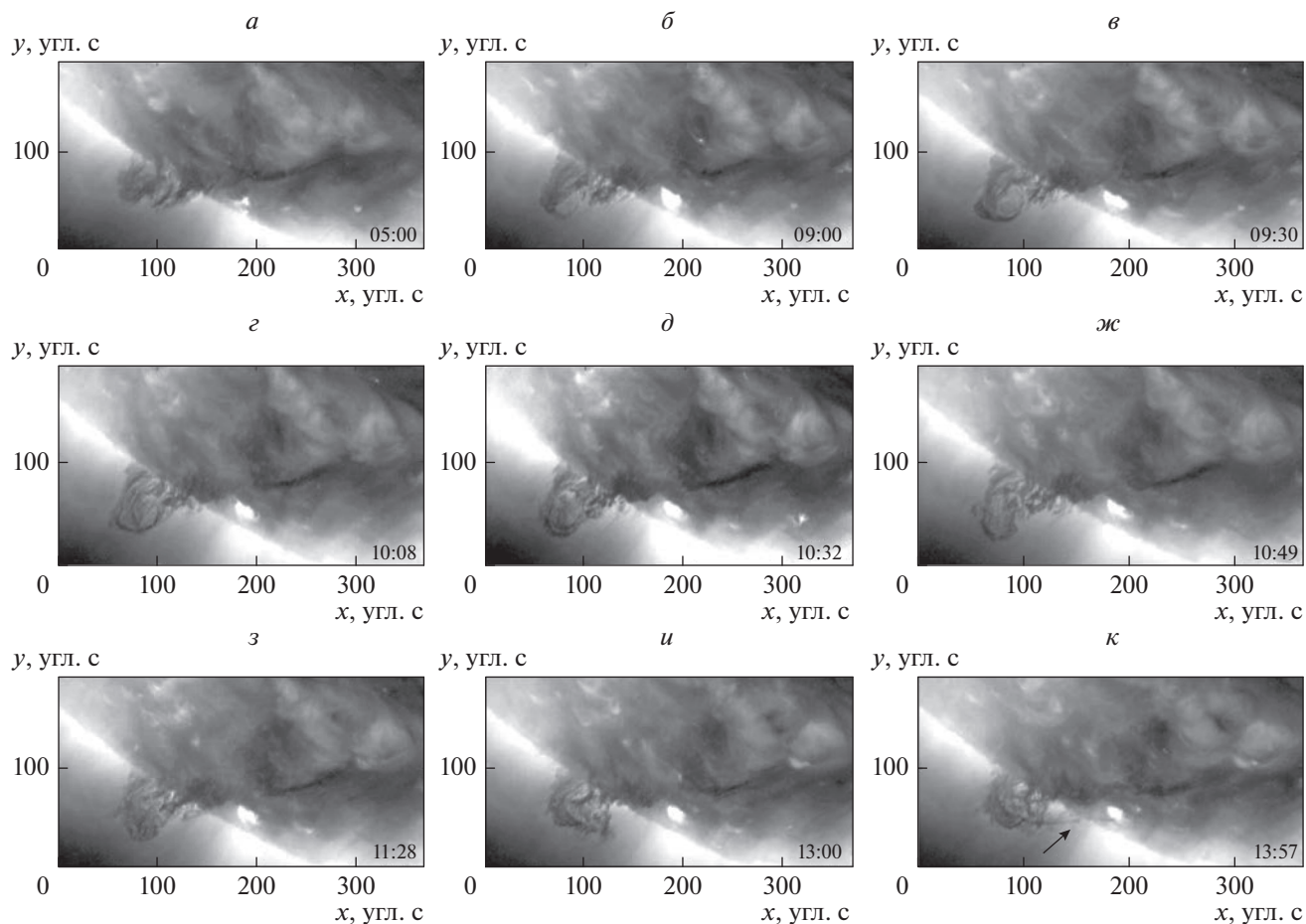
Наиболее отчетливо вращение в протуберанце видно на изображениях в линии  $H\alpha$ , полученных астрономом-любителем из Германии Александром Голичком (Alexander Golitschek, Darmstadt, Germany), размещенных на сайте <https://vsda.de/galerie/videos/>. На рисунке 5а приведен фрагмент одного из кадров в 10:29 UT с нанесенной белой овальной линией, вдоль которой преимущественно движется вещество в период с 10 UT до 12 UT. Стрелками показано направление вращательного

движения. На рисунке 5б показана временная диаграмма распределения яркости на изображениях вдоль этой линии от точки А до точки В в направлении против часовой стрелки. Наклонные полосы на диаграмме указывают на перемещение узелков протуберанца вдоль овальной траектории. Скорость в плоскости изображения составляет около 30 км/с.

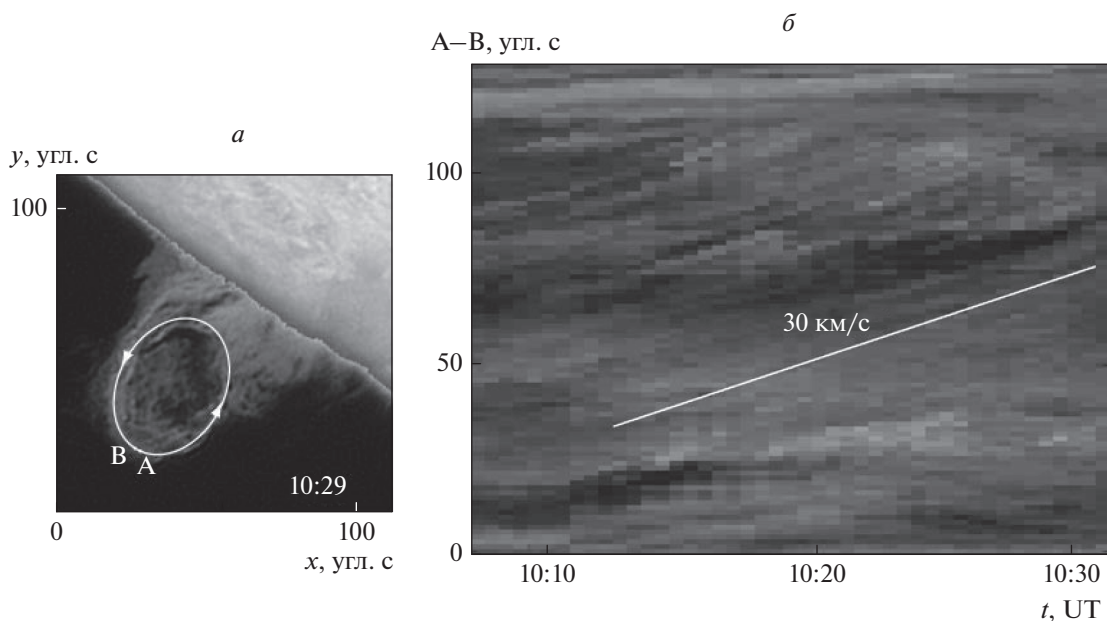
#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Солнечные протуберанцы представляют собой интересный объект исследований, поскольку некоторые процессы, происходящие в них, доступны “визуальному” наблюдению. Ряд свойств замагниченной плазмы, следующих из теоретических представлений и лабораторных экспериментов, может быть исследован и проверен в “чистом виде” в “природной астрофизической лаборатории”, где нет влияния границ установки и многих побочных факторов. Однако интерес к протуберанцам не только академический, но и вполне практический, так как их эрупции инициируют и снабжают веществом корональные выбросы – главный источник самых сильных возмущений геомагнитного поля и всей космической погоды.

Для установления причин эрупций протуберанцев и возможности прогнозирования этих явлений необходимо знать, какие силы определяют условия равновесия протуберанцев в короне и какие неустойчивости разрушают это равновесие. Конечно, одним из главных вопросов является представление о внутренней магнитной структуре протуберанцев. Поскольку прямые измерения магнитного поля в протуберанцах достаточно сложны и не имеют необходимого пространственного разрешения, приходится пользоваться косвенными данными о структуре плазменных



**Рис. 4.** Изменения вида спокойного протуберанца южного полярного венца вблизи восточного лимба Солнца во время активизации 4 марта 2022 г. в канале 193 Å SDO/AIA в период с 05:00 UT по 13:57 UT (а)–(к). Стрелкой на панели (к) показана прядь, вытягивающаяся в западном направлении, в сторону наблюдателя.



**Рис. 5.** Вид спокойного протуберанца южного полярного венца на восточном лимбе в линии H $\alpha$  (а) и диаграмма время – смещение узелков протуберанца вдоль эллиптической траектории А–В, показанной на левой панели (б).

образований, которые по разным оценкам должны контролироваться магнитным полем по причине преобладания магнитного давления в короне над газовым.

Один из самых перспективных типов моделей равновесия и эрупции протуберанцев основан на представлении о его внутренней магнитной структуре как о жгуте винтовых силовых линий. Однако винтовая структура волокон и протуберанцев видна только в отдельных случаях. Чаше спокойный протуберанец похож на широкий занавес с запутанной внутренней структурой. На основании многочисленных наблюдений была, например, предложена концептуальная морфологическая модель спокойного протуберанца, состоящая исключительно из арок, связанных с вкраплениями паразитной полярности по обе стороны линии раздела полярностей фотосферного магнитного поля [Martin et al., 1994; Lin et al., 2008]. Хотя эта модель встречается с большими трудностями с точки зрения физики, она дает структуру внешне очень похожую на вид протуберанца линии Н $\alpha$ .

Вместе с тем интенсификация движений внутри протуберанца, называемая активизацией, создает условия для проявления жгутовой внутренней структуры, наличие которой довольно трудно заподозрить в спокойном, почти статическом состоянии. Движение плазмы протуберанца вдоль магнитного поля или создает тонкие нити, визуализирующие силовые линии, или дает возможность проследить за траекториями плазменных сгустков, также следующих силовым линиям. Вращение узелков протуберанца южного полярного венца вблизи восточного лимба Солнца 4 марта 2022 г. против часовой стрелки и перемещение вещества в сторону наблюдателя свидетельствуют о правовинтовой конфигурации магнитного поля внутри протуберанца. Именно такие поля с положительным знаком спиральности характерны для южного полушария Солнца.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен сотрудникам Солнечной обсерватории Биг Бэр, научным группам проектов SOHO, TRACE, SDO и астроному-любителю Alexander Golitschek, Darmstadt, Germany за возможность доступа к материалам наблюдений. SOHO – совместный проект ESA и NASA. SDO – миссия NASA в рамках программы Living With a Star.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Куликова Г.Н., Молоденский М.М., Старкова Л.И., Филиппов Б.П. Токи в активной области HR16927 по данным Н $\alpha$  // Солнечные данные. № 10. Ленинград: Наука, 1986. С. 60–65.

– Филиппов Б.П. Некоторые особенности объединения солнечных волокон // Астрон. журн. Т. 88. № 6. С. 587–597. 2011.

– Филиппов Б.П. О морфологических признаках киральности солнечных волокон // Астрон. журн. Т. 94. № 10. С. 883–893. 2017.

– Филиппов Б.П. Выбросы вещества из солнечной атмосферы // УФН. Т. 189. № 9. С. 905–924. 2019.

– Amari T., Luciani J., Mikic Z., Linker J. A twisted flux rope model for coronal mass ejections and two-ribbon flares // Astrophys. J. V. 529. L49–L52. 2000.

– Cargill P.J. Coronal magnetism: Difficulties and prospects // Space Sci. Rev. V. 144. P. 413–421. 2009.

– Chae J. The magnetic helicity sign of filament chirality // Astrophys. J. Lett. V. 540. P. L115–L118. 2000.

– Chen J. Effects of toroidal forces in current loops embedded in a background plasma // Astrophys. J. V. 338. P. 453–470. 1989.

– Dere K.P., Brueckner G.E., Howard R.A., Michels D.J., Delaboudiniere J.P. LASCO and EIT observations of helical structure in coronal mass ejections // Astrophys. J. V. 516. P. 465–474. 1999.

– Filippov B., Martsenyuk O., Srivastava A.K., Uddin W. Solar magnetic flux ropes // J. Astrophys. Astron. V. 36. № 1. P. 157–184. 2015.

– Gary G.A. Plasma beta above a solar active region: rethinking the paradigm // Solar Phys. V. 203. P. 71–86. 2001.

– Gigolashvili M.Sh. An investigation of macroscopic motions using the Ca<sup>+</sup> lines in the prominence of 15 October 1969 // Solar Phys. V. 60. P. 293–298. 1978.

– Gosling J.T. The Role of reconnection in the formation of flux ropes in the solar wind / Magnetic Helicity in Space and Laboratory Plasmas. Eds. M.R. Brown, R.C. Canfield, A.A. Pevtsov, Geophysical Monograph. V. 111. Washington: American Geophysical Union. P. 205–212. 1999.

– Handy B.N., Acton L.W., Kankelborg C.C. The transition region and coronal explorer // Solar Phys. V. 187. P. 229–260. 1999.

– Joshi N.C., Srivastava A.K., Filippov B., Kayshap P., Uddin W., Chandra R., Choudhary P.D., Dwivedi B.N. Confined partial filament eruption and its reformation within a stable magnetic flux rope // Astrophys. J. V. 787. 11. 2014.

– Kliem B., Török T. Torus instability // Phys. Rev. Lett. V. 96. № 25. 255002. 2006.

– Lemen J.R., Title A.M., Akin D.J., et al. The Atmospheric Imaging Assembly (AIA) on the Solar Dynamics Observatory (SDO) // Solar Phys. V. 275. P. 17–40. 2012.

– Leroy J.-L. Observation of prominence magnetic fields / Dynamics and structure of quiescent solar prominences; Proceedings of the Workshop, Palma de Mallorca, Spain, Nov. 1987. Ed. E.R. Priest, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. P. 77–113. 1989.

– Li X., Morgan H., Leonard D., Jeska L. A solar tornado observed by AIA/SDO: Rotational flow and evolution of magnetic helicity in a prominence and cavity // Astrophys. J. V. 752. L22. 2012.

– Liggett M., Zirin H. Rotation in prominences // Solar Phys. V. 91. P. 259–267. 1984.

- *Lin J., Forbes T.G., Isenberg P.A., Demoulin P.* The effect of curvature on flux-rope models of coronal mass ejections // *Astrophys. J. V. 504.* P. 1006–1019. 1998.
- *Lin H., Penn M.J., Tomczyk S.* A new precise measurement of the coronal magnetic field strength // *Astrophys. J. V. 541.* P. L83–L86. 2000.
- *Lin Y., Engvold O., Rouppe van der Voort L., Wiik J.E., Berger T.E.* Thin threads of solar filaments // *Solar Phys. V. 226.* P. 239–254. 2005.
- *Lin Y., Martin S.F., Engvold O.* Filament substructures and their interrelation / *Subsurface and Atmospheric Influences on Solar Activity.* Eds. *R. Howe, R.W. Komm, K.S. Balasubramaniam, G.J.D. Petrie.* ASP Conf. Ser. V. 383. San Francisco: Astron. Soc. Pacific. P. 235–242. 2008.
- *Low B.C.* Coronal mass ejections, magnetic flux ropes, and solar magnetism // *J. Geophys. Res. V. 106.* P. 25141–25164. 2001.
- *Lynch B.J., Antiochos S.K., DeVore C.R., Luhmann J.G., Zurbuchen T.H.* Topological evolution of a fast magnetic breakout CME in three dimensions // *Astrophys. J. V. P. 1192–1206.* 2008.
- *Martin S.F., Echols C.R.* An observational and conceptual model of the magnetic field of a filament / *Solar Surface Magnetism.* Ed. *R.J. Rutten, C.J. Schrijver,* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. P. 339–346. 1994.
- *Martin S.F., Lin Y., Engvold O.* A method of resolving the 180-degree ambiguity by employing the chirality of solar features // *Solar Phys. V. 250.* P. 31–51. 2008.
- *Orozco Suárez D., Asensio Ramos A., Trujillo Bueno J.* Evidence for rotational motions in the feet of a quiescent solar prominence // *Astrophys. J. Lett. V. 761.* L25. 2012.
- *Panasenco O., Martin S.F., Velli M.* Apparent solar tornado-like prominences // *Solar Phys. V. 289.* P. 603–622. 2014.
- *Panesar N.K., Innes D.E., Tiwari S.K., Low B.C.* A solar tornado triggered by flares? // *Astron. Astrophys. V. 549.* A105. 2013.
- *Pettit E.* The forms and motions of the solar prominences // *Publ. Yerkes Obs. V. 3.* P. 205–240. 1925.
- *Pevtsov A.A., Balasubramaniam K.S., Rogers J.W.* Chirality of chromospheric filaments // *Astrophys. J. V. 595.* P. 500–505. 2003.
- *Rompolt B.* Spectral features to be expected from rotational and expansional motions in fine solar structures // *Solar Phys. V. 41.* P. 329–348. 1975.
- *Rompolt B.* Small scale structure and dynamics of prominences // *Hvar Obs. Bull. V. 14.* P. 37–102. 1990.
- *Su Y., Wang T., Veronig A., Temmer M., Gan W.* Solar magnetized “tornadoes:” relation to filaments // *Astrophys. J. Lett. 756,* L41. 2012.
- *Titov V.S., Demoulin P.* Basic topology of twisted magnetic configurations in solar flares // *Astron. Astrophys. V. 351.* P. 707–720. 1999.
- *Vršnak B., Ruždjak V., Rompolt B.* Stability of prominences exposing helical-like patterns // *Solar Phys. V. 136.* P. 151–167. 1991.
- *Vršnak B., Ruždjak V., Rompolt B., Rosa D., Zlobec P.* Kinematics and evolution of twist in the eruptive prominence of August 18, 1980 // *Solar Phys. V. 146.* P. 147–162. 1993.
- *Wang H., Cao W., Liu C., Xu Y., Liu R., Zeng Z., Chae J., Ji H.* Witnessing magnetic twist with high-resolution observation from the 1.6-m New Solar Telescope // *Nature Communications. V. 6.* 7008. 2015.
- *Wedemeyer-Böhm S., Scullion E., Rouppe van der Voort L., Bosnjak A., Antolin P.* Are giant tornadoes the legs of solar prominences? // *Astrophys. J. V. 774.* 123. 2013.
- *Wiegelmann T., Thalmann J.K., Solanki S.K.* The magnetic field in the solar atmosphere // *Astron. Astrophys. Rev. V. 22.* 78. 2014.
- *Yang S., Zhang J., Liu Z., Xiang Y.* New vacuum solar telescope observations of a flux rope tracked by a filament activation // *Astrophys. J. V. 784.* L36. 2014.
- *Yang Z., Bethge C., Tian H. et al.* Global maps of the magnetic field in the solar corona // *Science V. 369.* № 6504. P. 694–697. 2020.
- *Zuccarello F.P., Meliani Z., Poedts S.* Numerical modeling of the initiation of coronal mass ejections in active region NOAA 9415 // *Astrophys. J. V. 758.* 117. 2012.