

НЕОБЫЧНОЕ СВЕТЛОЕ ОБРАЗОВАНИЕ В ТЕНИ ПЯТНА NOAA 12109. НАБЛЮДЕНИЯ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2019 г. О. А. Ожогина^{1*}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Поступила в редакцию 22.05.2019 г.; после доработки 24.06.2019 г.; принята к публикации 25.06.2019 г.

Двенадцатого июля 2014 г. на горизонтальном солнечном телескопе Саянской обсерватории проводились наблюдения необычного светлого образования в тени пятна NOAA 12109. От традиционных светлых мостов оно отличалось тем, что находилось целиком внутри тени без видимой связи с полутенью или фотосферой. По внешнему виду наблюдавшееся светлое образование больше напоминает светлый “остров”. Проведено сканирование в двух спектральных диапазонах: ультрафиолетовом (3930–3975 Å) и инфракрасном (8490–8560 Å). По полученным спектрограммам построены изображения в обоих континуумах, двух линиях Ca II (8498 Å и 3933.6 Å) и четырех слабых линиях (3963.7 Å Cr I, 3969.3 Å Fe I, 8514.1 Å Fe I, 8556.8 Å Si I). Получено, что контраст образования зависит от спектрального диапазона и падает с высотой. В светлом образовании обнаружены восходящие лучевые скорости порядка 500 м/с по инфракрасным линиям и до 3000 м/с по ультрафиолетовым относительно тени пятна, в которой, в свою очередь, наблюдались нисходящие (до 1000 м/с) потоки относительно окружавших пятно участков спокойного солнца.

Ключевые слова: Солнце, солнечные пятна, светлый мост.

DOI: 10.1134/S0320010819090031

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что тень пятна неоднородна по своей структуре и включает в себя участки с различной интенсивностью. Светлые элементы тени бывают двух видов. Так называемые яркие точки (bright umbral dots) являются короткоживущими (≈ 10 – 30 мин) и мелкомасштабными (≈ 300 км) структурами. В противоположность им светлые мосты (light bridges), долгоживущие (более суток) и крупномасштабные объекты. Их описывают как протяженные светлые полосы, внедряющиеся в тень пятна из полутени и часто пересекающие ее, протягиваясь с одной стороны тени на другую. Существует несколько классификаций светлых мостов по виду, размерам, происхождению (см., например, Брей, Лоухед, 1967; Обридко, 1985; Соланки, 2003; Томас, Вайс, 2008). В любом случае они являются объектами, связанными как минимум одним концом с полутенью или фотосферой. 11–12 июля 2014 г. в тени пятна NOAA 12109 наблюдалось необычное светлое образование, похожее на светлый мост, но находящееся целиком внутри тени, без выхода в полутень. Найти подобные структуры ни по нашему архиву наблюдений, ни по литературным данным не удалось.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились 12 июля 2014 г. около 00 UT на горизонтальном солнечном телескопе Саянской обсерватории. Автоматизированный солнечный телескоп (АСТ) оборудован двухкамерным спектрографом, что позволяет получать одновременные спектрограммы в двух диапазонах на одном приемнике. Для регистрации спектра использовалась ПЗС-камера FLI 2084 × 2084 пикселей. На один пиксель размером 24 мкм приходилось 0.42 угл. сек. С помощью стопы стеклянных цветных фильтров, помещенных перед камерой, были выделены два диапазона из четвертого и второго порядков спектра: ультрафиолетовый (УФ), содержащий линии H (3968 Å) и K (3933.6 Å) Ca II, и инфракрасный (ИК) — область двух инфракрасных линий — 8498 Å и 8542 Å Ca II. Изображение пятна перемещалось поперек щели спектрографа с шагом около 1 угл. сек, и в каждом положении снималось по 10 кадров, всего было получено 43 серии. Ввиду отсутствия адаптивной оптики, с целью минимизации эффектов дрожания изображения был проведен корреляционный анализ в каждой серии. По результатам сравнения разрезов поперек дисперсии в континууме выбраковывались кадры с “плохой” (<99%) корреляцией со средним

*Электронный адрес: ozhog@iszf.irk.ru

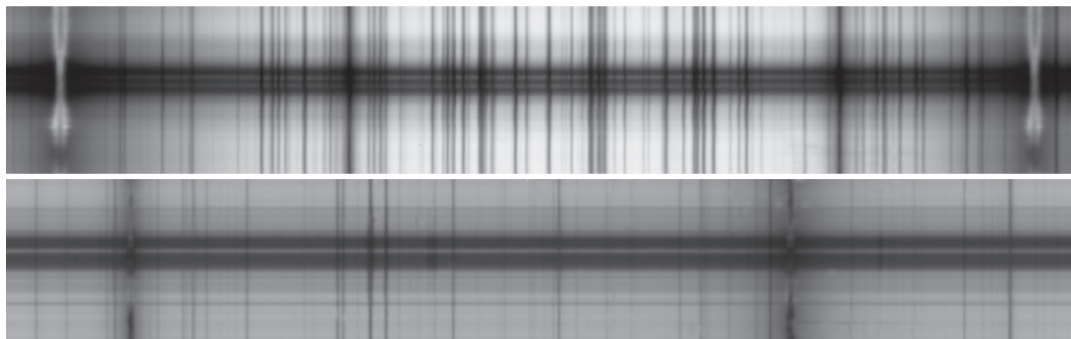


Рис. 1. Спектрограммы пятна NOAA 12109, полученные 12 июля 2014 г. на горизонтальном солнечном телескопе Саянской обсерватории. Вверху — ультрафиолетовый (3930–3975 Å) и внизу — инфракрасный (8490–8560 Å) диапазоны.

кадром по серии. В окончательную обработку входило от 6 до 10 снимков серии, по которым проводилось усреднение. Все спектры были подвергнуты стандартной процедуре исправления за темновой ток и плоское поле. Координаты пятна во время сканирования были W48S08.

ОБРАБОТКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 1 приведены примеры полученных спектров. Первое, что обращает на себя внимание, это различный вид светлого образования в двух диапазонах. В инфракрасной полосе наблюдается яркая эмиссия в центре пятна, тогда как в ультрафиолетовой полосе в этом месте расположен участок с минимальной интенсивностью, окруженный двумя слабыми эмиссиями.

По полученным спектрограммам были построены изображения пятна в двух континуумах (ультрафиолетовом и инфракрасном), в четырех сильных линиях ионизованного кальция и в нескольких более слабых линиях обоих диапазонов. К сожалению, оказалось, что при сканировании часть восточной полутени не была снята. Недостающие участки полутени пришлось дополнить кадрами из другой серии, снятой сразу после основной, при выключенном часовом ведении телескопа и с меньшим пространственным разрешением (около 4 угл. сек).

Из-за явления дифференциальной рефракции, заключающегося в изменении угла рефракции светового луча в зависимости от его длины волны, построенные изображения в УФ- и ИК-диапазонах оказались сдвинуты друг относительно друга. Они были отцентрированы с помощью корреляционного анализа. На рис. 2 приведены изображения пятна NOAA 12109 в УФ- и ИК-континуумах и по данным SDO/HMI. Как можно было ожидать уже из рассмотрения спектров, светлое образование в тени пятна в ИК-диапазоне и в ультрафиолете

существенно различаются. В первом случае оно выглядит как яркий изолированный “остров”, а во втором — как слабое светлое кольцо. Интенсивность “острова” относительно интенсивности спокойного солнца в ИК-диапазоне составляет 0.5, интенсивность кольца в УФ-диапазоне составляет 0.13.

На снимке SDO/HMI, полученном вне земной атмосферы и с лучшим пространственным разрешением (0.5 угл. сек), видно, что это образование является дугообразной структурой и внешне похоже на подкову с относительной интенсивностью в “верхней” части 0.57.

Помимо изображений в континуумах, были построены изображения в восьми линиях ИК- и в 16 линиях УФ-диапазонов. В данной работе для анализа были выбраны линии Ca II и по две линии каждого диапазона, для которых высоты образования в спокойном солнце были взяты из литературы. Чтобы минимизировать влияние континуума на эти изображения, они строились для разности интенсивностей континуума и линии, нормированной на аналогичную разность в ближайшем участке спокойного солнца. В УФ-диапазоне, ввиду того что все линии лежат в крыльях H и K Ca II, и на спектрограммах отсутствует континуум, вместо него бралась максимальная интенсивность соответствующего участка огибающей спектра. На рис. 3 приведены изображения, построенные по линиям Ca II (3933 Å и 8498 Å), по линиям 3963.7 Å Sr I, 3969.3 Å Fe I (высоты образования составляют 250 км и 600 км соответственно, см. Бек и др., 2009), и по линиям 8514.1 Å Fe I, 8556.8 Å Si I (высоты образования составляют 523 км и 292 км соответственно, см. Гуртовенко, Костик, 1998). Справа приведены графики интенсивностей для двух взаимно перпендикулярных разрезов, проходящих через светлое образование.

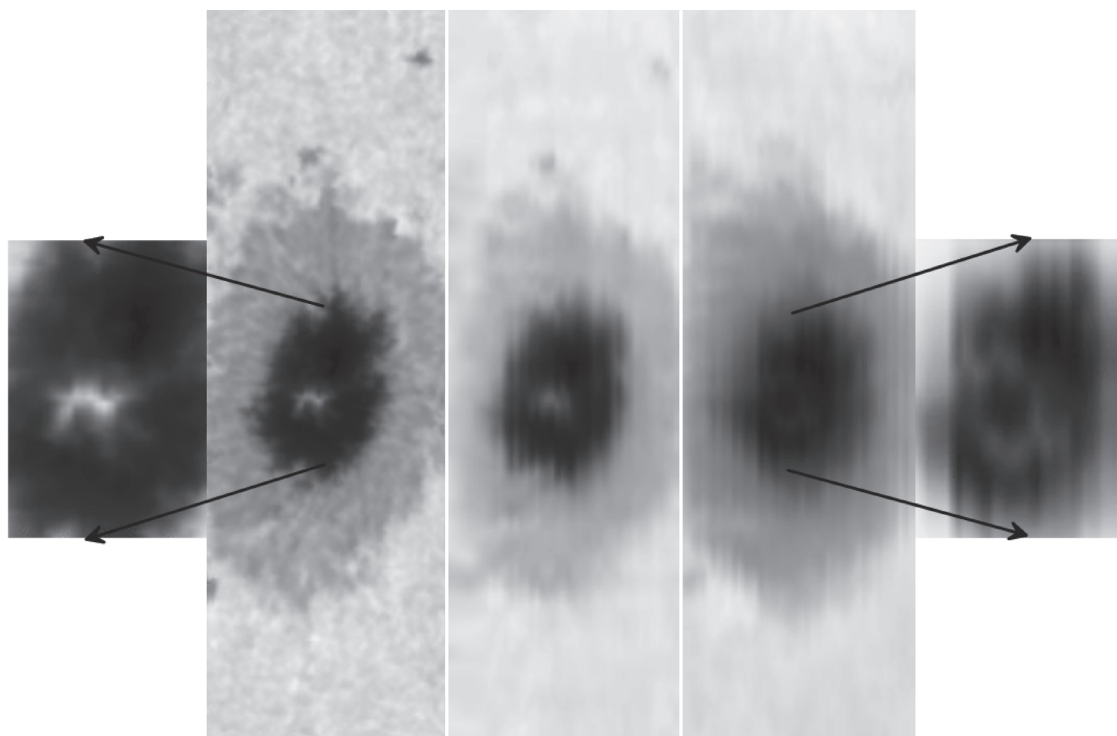


Рис. 2. Изображение пятна NOAA 12109 12 июля 2014 г. в 00 UT. Слева направо: в континууме SDO/HMI, в ИК-континууме и УФ-квазиконтинууме по наблюдениям на горизонтальном солнечном телескопе Саянской обсерватории.

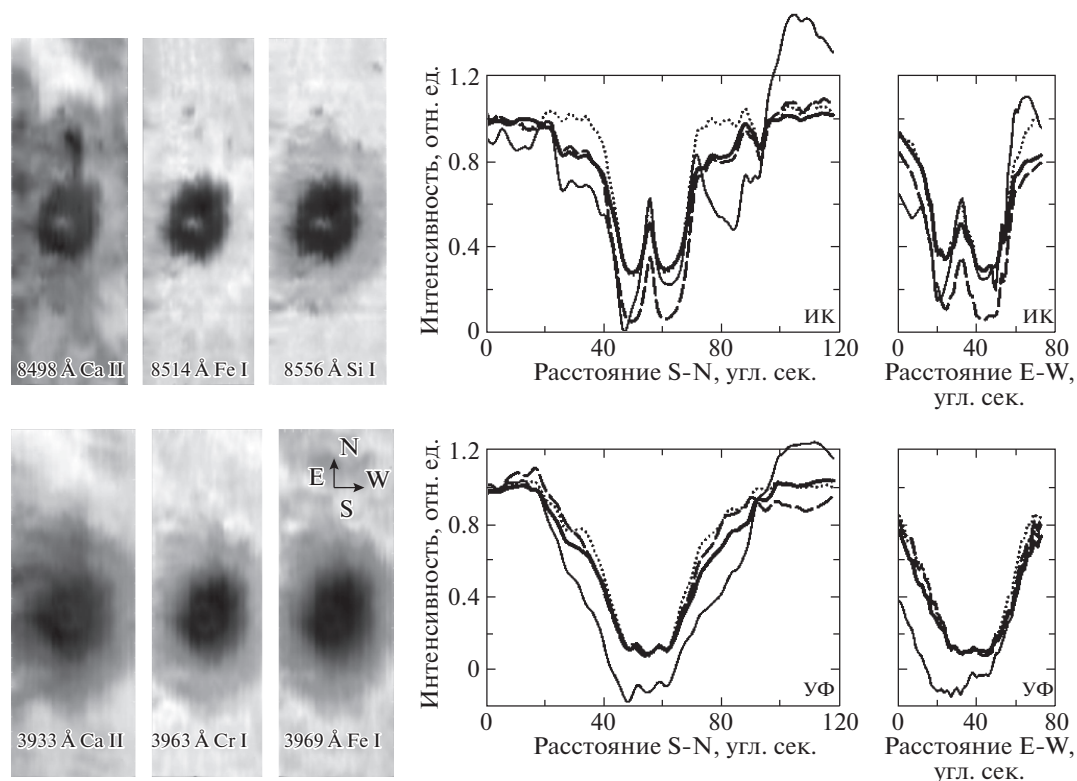


Рис. 3. Изображения пятна NOAA 12109 12 июля 2014 г., построенные для ядер линий, и графики относительных интенсивностей для разрезов S-N и E-W, проходящих через светлое образование. Верхний ряд (слева направо): 8498 Å Ca II (на графике обозначена сплошной линией), 8514 Å Fe I (пунктирная линия), 8556 Å Si I (штриховая линия). Нижний ряд (слева направо): 3933 Å Ca II (сплошная линия), 3963 Å Cr I (шриховая линия), 3969 Å Fe I (пунктирная линия). Толстой сплошной линией на графиках обозначены разрезы соответствующих изображений ИК- и УФ-континуумов.

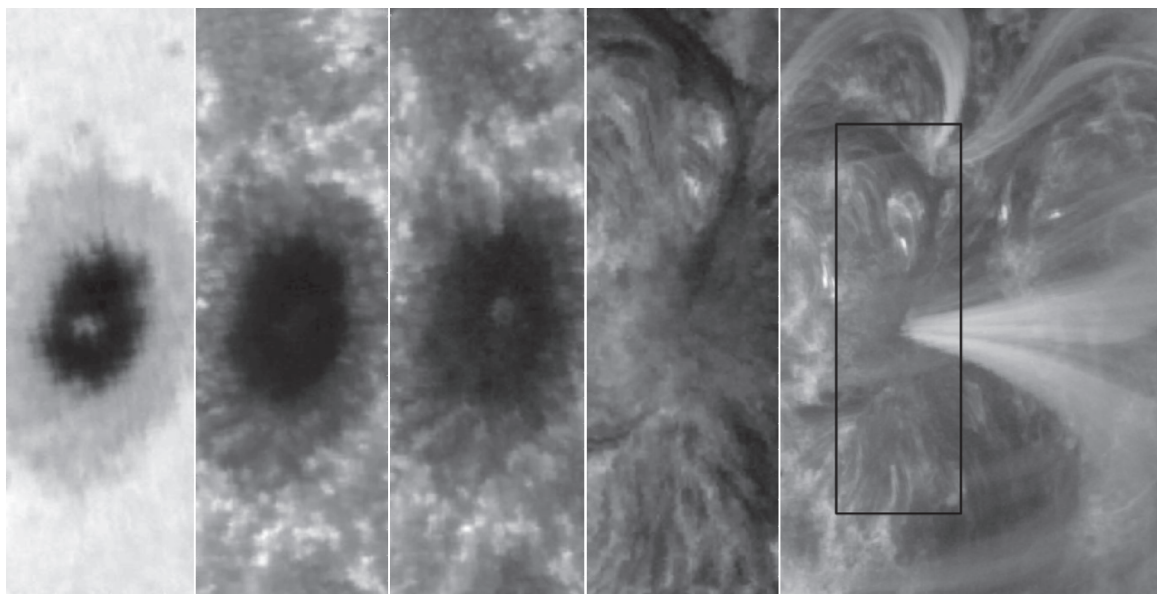


Рис. 4. Изображение пятна NOAA 12109 12 июля 2014 г. в 00 UT по данным SDO/AIA. Слева направо: 4500 Å, 1700 Å, 1600 Å, 304 Å и 171 Å (рамкой выделена область, соответствующая нашим изображениям). Все снимки, кроме первого, приведены в логарифмической шкале.

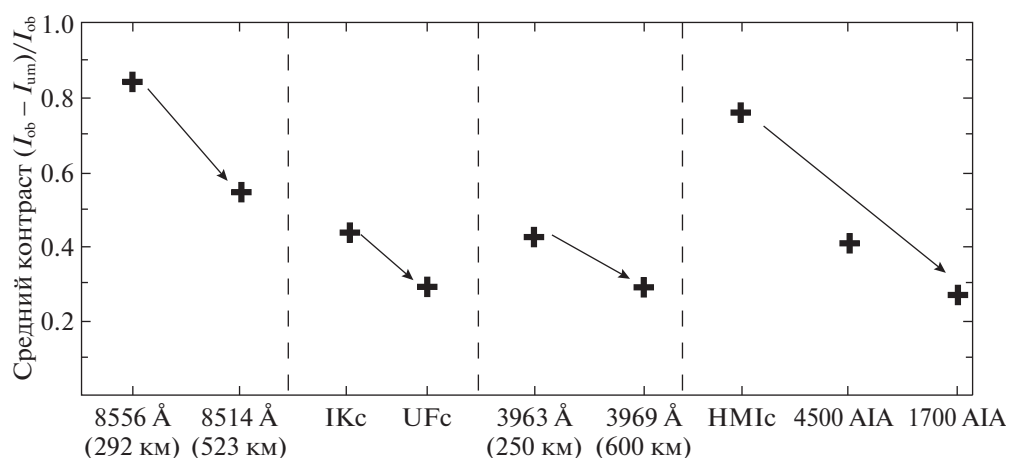


Рис. 5. Средний контраст: разность между интенсивностью образования и интенсивностью тени, нормированная на интенсивность образования для разных спектральных диапазонов.

На снимках SDO/AIA это образование хорошо видно в континууме 4500 Å (интенсивность $I = 0.51$). В континуумах 1700 Å и 1600 Å оно практически неразлично ($I = 0.17$), и в последнем случае смещено по пространству. В УФ-линиях 304 Å, 171 Å и 193 Å образование отсутствует. На высотах верхней переходной области и короны (линии 171 Å и 193 Å) в этом месте находится основание мощной петли. На рис. 4 приведены соответствующие изображения SDO/AIA в логарифмической шкале (кроме полосы 4500 Å).

На рис. 5 показан средний контраст образо-

вания (разность между интенсивностями образования и тени, нормированная на интенсивность образования) для выбранных линий, континуумов и по данным SDO. По оси абсцисс приведены длины волн линий и интегральные полосы (ИК-континуум и УФ-квазиконтинуум), в которых строились изображения, в порядке возрастания высоты для каждого диапазона отдельно. Поскольку в нашем УФ-спектре нет участков континуума, а присутствует только квазиконтинуум, и изображение строилось в нем (3954 Å), то высота образования этого участка спектра больше, чем высота образования ин-

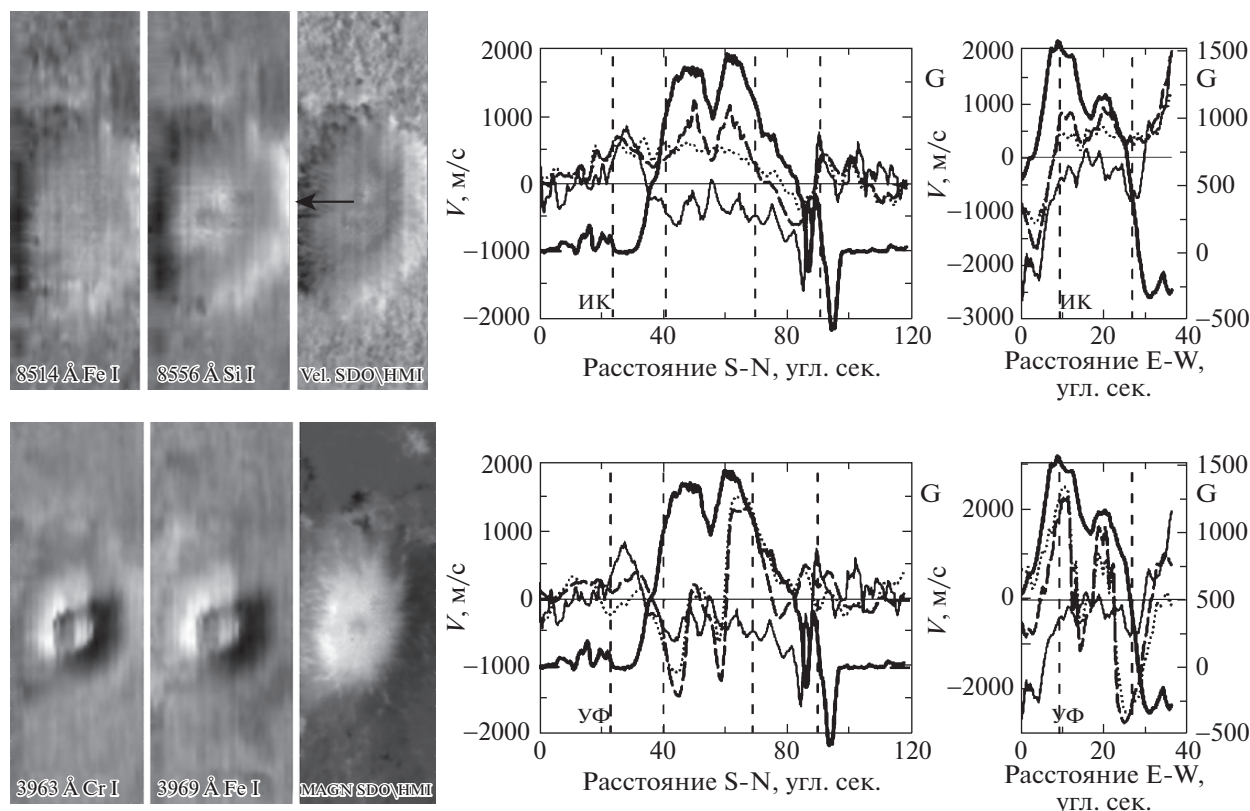


Рис. 6. Изображения пятна NOAA 12109 12 июля 2014 г. в лучевых скоростях, построенные для минимумов линий, и графики скоростей для разрезов S-N и E-W, проходящих через светлое образование. Верхний ряд (слева направо): 8514 Å Fe I (на графике обозначена пунктирной линией), 8556 Å Si I (шриховая линия), доплерограмма с SDO/HMI (сплошная линия). Нижний ряд (слева направо): 3963 Å Cr I (шриховая линия), 3969 Å Fe I (пунктирная линия), магнитограмма с SDO/HMI (на графиках напряженность магнитного поля обозначена толстой сплошной линией, а шкала значений приведена справа). Вертикальные штриховые линии обозначают границы тень/полутень и полутень/спокойное солнце.

фрактального континуума. Видно, что с увеличением высоты контраст образования падает.

Кроме изображений в линиях, были построены карты лучевых скоростей, вычисленные по положению минимума линии относительно среднего положения минимума в спокойном солнце. На рис. 6 представлены доплерограммы для линий 3963.7 Å Cr I, 3969.3 Å Fe I, 8514.1 Å Fe I, 8556.8 Å Si I, а также доплерограмма и магнитограмма по SDO/HMI. Светлые участки соответствуют положительным скоростям (опускание), а темные — отрицательным скоростям (подъем). Справа представлены графики скоростей для разрезов, аналогичных рис. 3. На этих же графиках приведена напряженность магнитного поля (толстая сплошная линия), ось ординат для этой величины расположена справа. Стрелкой указано направление на центр диска, которое практически параллельно оси абсцисс. Благодаря этому графики, на которых представлены разрезы “восток–запад”, хорошо отражают эффект Эвершеда. Мы устано-

вили, что скорости Эвершеда в полутени в ИК-линиях составляют около 1000–1500 м/с и близки к значениям по SDO/HMI (1500–2000 м/с). В ультрафиолете они меньше (500–1000 м/с), а для линии 3969.3 Å практически нулевые на западе, и даже другого знака (+500 м/с) на востоке. В тени пятна по ИК-линиям идет устойчивое опускание вещества со скоростями 500–1100 м/с с замедлением на величину до 50% в месте нахождения светлого “острова”. В УФ-диапазоне картина более контрастна: максимальные скорости в тени пятна находятся около границы тень/полутень и имеют направление, противоположное течению Эвершеда: на востоке — опускание (2200 м/с), на западе — подъем (2500 м/с). В районе светлого образования происходит резкое изменение знака скорости, опускание сменяется подъемом со скоростью до 1000 м/с.

ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдаемое светлое образование морфологически напоминает светлый мост. Согласно изображениям SDO/HMI, оно наблюдалось около двух суток, развиваясь из едва заметного слабого пятнышка около западной границы тени до яркого, дугообразного образования в центре тени пятна. Наши наблюдения попали на интенсивную фазу его развития, после которой, примерно через 8 ч, началось постепенное уменьшение яркости, возможно связанное еще и с перемещением пятна к западному лимбу и соответственно с увеличением высоты наблюдения. По нашим данным, контраст образования в разных линиях и диапазонах существенно отличается друг от друга и, как уже отмечалось выше (см. график на рис. 5), с высотой уменьшается. Одной из наиболее обширных по количеству исследуемых светлых мостов (11 мостов в девяти пятнах) является работа Лека (1997). Используя данные таблицы 3А из этой статьи, можно посчитать, что контрасты мостов меняются в довольно широких пределах даже для одного спектрального диапазона (видимый континуум) — от 0.26 до 0.76.

Так же, как и в обычных светлых мостах (см., например, Беккерс, Шретер, 1969; Фирстова, Григорьев, 1971; Абдуссаматов, 1971; Лайтс и др., 1991; Рюди и др., 1995; Лека, 1997; Катцукава и др., 2007), в этом образовании наблюдалось уменьшение напряженности продольного магнитного поля на величину до 500 Г по сравнению с полем окружающей тени (SDO/HMI). Обридко (1974, 1979) для ярких точек тени, а Лека (1997) для светлых мостов предположили, что светлые образования являются проявлением интрузии незамагниченного (field-free) подфотосферного вещества. Магнитное поле тени раздвигается этим вторжением и смыкается выше него. Аналогичные схемы можно увидеть в работах Спрюта (2006), Жюрчака и др. (2006), Лагга и др. (2014). Такая физическая картина предполагает наличие существенных восходящих скоростей, и многочисленные исследования демонстрируют различные их значения, что частично может быть объяснено разнообразием методик и инструментов, применяемых авторами. Лайтс и др. (1991) и Риммель (1997) показали (по линиям Fe I 5576 Å и Fe I 5691 Å), что гранулы, из которых состоит фотосферный светлый мост, имеют восходящие вертикальные скорости (до 300 м/с), которые коррелируют с интенсивностью. В упоминавшейся выше работе Лека (1997) (Fe I 6301.5 Å, Fe I 6302.5 Å), в большинстве случаев был обнаружен подъем вещества в светлых мостах относительно тени пятна со скоростями 100–400 м/с, но были

случаи и опускания. В более поздних работах с высоким пространственным разрешением и с применением различных инверсионных методик было показано, что вдоль светлого моста часто наблюдается темная полоса, в которой регистрируются восходящие потоки, а по сторонам, в светлой части — нисходящие. В работе Риммеля (2008) приводятся скорости ± 300 м/с, а Руппе ван дер Вурт и др. (2010) зафиксировали скорости до ± 1200 м/с. В других работах выделяются конвективные ячейки светлого моста, в которых во внутренней части наблюдается подъем вещества и опускание на границах. Так, например, в работе Лагга и др. (2014) приводятся скорости подъема до 3000 м/с и опускания до 9000 м/с, а Фелипе и др. (2016) дают соответствующие значения 1000 и 2000 м/с.

В наших прямых наблюдениях, с умеренным пространственным разрешением мы обнаружили, что в районе светлого образования также наблюдается подъем вещества относительно тени пятна в обоих спектральных диапазонах (см. графики на рис. 6). По ИК-линиям она достигает 500 м/с, а по УФ-линиям — 3000 м/с относительно тени пятна и до 1000 м/с относительно средних скоростей спокойного солнца. Столь существенная разница в скоростях может быть обусловлена тем, что спектральные линии имеют различную чувствительность к различным термодинамическим параметрам среды, в которой они формируются. В работе Кабрера Солана и др. (2005) показано, что хотя доплеровский сдвиг больше для больших длин волн, но не менее важна и форма линии, а именно ее крутизна — отношение глубины и ширины линии. С увеличением длины волны тепловая ширина линии увеличивается, что ведет к уменьшению этого отношения и, следовательно, к падению чувствительности линии к скоростям по лучу зрения. Таким образом, можно ожидать, что УФ-линии более чувствительны к доплеровским скоростям, чем ИК-линии. Конечно, для подтверждения этого надо проводить расчеты для каждой конкретной линии. Можно только отметить, что если иметь в виду высоты образования линий для спокойного солнца, то по обоим диапазонам наблюдается уменьшение скорости подъема с высотой. В табл. 1 приведены значения скоростей в светлом образовании относительно тени пятна для линий 3963.7 Å Cr I, 3969.3 Å Fe I, 8514.1 Å Fe I, 8556.8 Å Si I.

Еще одной особенностью этого пятна является то, что, по нашим наблюдениям, в тени пятна наблюдаются довольно существенные скорости опускания: 500–800 м/с по ИК-линиям и до 2200 м/с по УФ-линиям. Надо учесть, что мы проводили измерения скоростей относительно участков спокойного солнца, которые, как известно,

Таблица 1. Скорости подъема в светлом образовании относительно тени пятна

Диапазон	Линия	Длина волны, Å	Высота образования, км	Скорость, м/с
ИК	Si I	8556.8	292	560
	Fe I	8514.1	523	250
УФ	Cr I	3963.7	250	2700
	Fe I	3969.3	600	2060

имеют восходящие скорости порядка 400 м/с на уровне фотосферы. С учетом этого реальные лучевые скорости в тени пятна по ИК-линиям могут достигать нескольких сотен метров и до 1500 м/с по УФ-линиям.

Считается, что в тени пятна на уровне фотосферы конвективное движение подавлено сильным магнитным полем. В большинстве исследований указываются незначительные отрицательные скорости от -50 до -120 м/с. Беккерс (1977) провел абсолютные измерения доплеровских скоростей по линии Ti I 5713.9 Å в наиболее темных участках тени и получил, что систематические движения там отсутствуют, а скорости в основном лежат в интервале ± 25 м/с. Через почти 40 лет Лехнер-Бетчер и др. (2018) повторили эти измерения для нескольких пятен, наблюдавшихся в июле–августе 2014 г. Их исследование отличается беспрецедентной спектроскопической точностью, позволяющей определить доплеровские сдвиги для линии Ti I 5713.9 Å с точностью до 5 м/с. Они получили, что почти во всех пятнах доплеровские скорости для центра линии лежат в интервале от -20 до -70 м/с (см. их рис. 5), и только в одном пятне, NOAA 12109, скорости оказались положительными: 30–40 м/с для ядра линии. Убедительных объяснений столь сильных отклонений от средних значений скорости авторы найти не смогли, заметив, что, возможно, это какое-то особенное пятно. И хотя в общей статистике скоростей они его учли, но из анализа связи скорости с различными параметрами пятна исключили. Для своих измерений авторы старались выбирать наиболее темные участки тени по изображениям в полосе G (4307 Å). Судя по приведенному изображению пятна (см. их рис. A.3), полученному через 15 ч после нашего наблюдения, светлое образование на их снимках не было видно, но на снимках SDO/HMI оно еще различимо. Видимо, здесь сыграл роль эффект уменьшения контраста образования в синем диапазоне спектра, наложенный на эффект наблюдения более высоких

слоев атмосферы при приближении к лимбу. Можно сделать заключение, что наблюдения Лехнер-Бетчер и др. (2018) подтверждают наши, хоть и существенно более грубые наблюдения, поскольку имеется хорошее согласие как по знаку скорости, так и по порядку величин, особенно для ИК-линий.

ВЫВОДЫ

11–12 августа 2014 г. в тени пятна NOAA 12109 наблюдалось необычное светлое образование. Полученные изображения в двух спектральных диапазонах (3930–3975 Å и 8490–8560 Å) существенно отличаются друг от друга. Обнаружено, что контраст образования уменьшается с высотой. В месте его нахождения зарегистрированы восходящие относительно тени потоки со скоростями порядка 300–500 м/с по ИК-линиям и до 3000 м/с по УФ-линиям. В тени пятна зарегистрированы скорости опускания относительно окружающих участков спокойного солнца со скоростями 500–1000 м/с по ИК-линиям и до 2200 м/с в УФ-диапазоне. На изображениях SDO/AIA в линиях верхней переходной области и короны 171 Å и 193 Å в тени этого пятна вблизи светлого образования находится основание мощной корональной петли. По основным морфологическим признакам таким, как время жизни, яркость, уменьшение напряженности магнитного поля, восходящие скорости, наблюдавшееся светлое образование похоже на светлый мост. Но отсутствие связи с полутенью очень необычно, и, насколько нам известно, ранее такое явление не наблюдалось. Даже терминологически такое образование сложно назвать мостом, скорее, ему подходит название: светлый остров. Изучение этого явления будет продолжено в дальнейшем.

Автор благодарит В.М. Григорьеву, Н.И. Кобанова и Л.В. Ермакову за доброжелательное обсуждение, а также группу SDO за возможность доступа к данным. Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16, с использованием оборудования ЦКП “Ангара” <http://ckp-gi.ru/ckp/3056/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдуссаматов (H.I. Abdussamatov), *Solar Phys.* **16**, 384A (1971).
2. Бек и др. (C. Beck, E. Khomenko, R. Rezaei, and M. Collados), *Astron. Astrophys.* **507**, 453 (2009).
3. Беккерс (J.M. Beckers), *Astrophys. J.* **213**, 900 (1977).
4. Беккерс, Шретер (J.M. Beckers and E.H. Schröter), *Solar Phys.* **10**, 384 (1969).
5. Брей Р., Лоухед Р., *Солнечные пятна* (М.: Мир, 1967).

6. Гуртовенко, Костик (E.A. Gurtovenko and R.I. Kostik), *The system of solar oscillator strengths* (Kyiv, preprint, 1998).
7. Жюрчак и др. (J. Jurčák, V.M. Martinez, and M. Sobotka), *Astron. Astrophys.* **453**, 1079 (2006).
8. Кабрера Солана и др. (D. Cabrera Solana, L.R. Bellot Rubio, and J.C. del Toro Iniesta), *Astron. Astrophys.* **439**, 687 (2005).
9. Катцукава и др. (Y. Katsukawa, T. Yokoyama, T.E. Berger, K. Ichimoto, M. Kubo, B. Lites, Sh. Nagata, T. Shimizu, et al.), *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, 577 (2007).
10. Лагг и др. (A. Lagg, S.K. Solanki, M. van Noort, and S. Danilovic), *Astron. Astrophys.* **568**, A60 (2014).
11. Лайтс и др. (B.W. Lites, T.A. Bida, A. Johannesson, and G.B. Scharmer), *Astrophys. J.* **737**, 683 (1991).
12. Лека (K.D. Leka), *Astrophys. J.* **484**, 900 (1997).
13. Лехнер-Бетчер и др., (J. Löhner-Böttcher, W. Schmidt, R. Schlichenmaier, H.-P. Doerr, T. Steinmetz, and R. Holzwarth), *Astron. Astrophys.* **617**, A19 (2018).
14. Обридко В.Н., *Астрон. журн.* **51**, 6, 1272 (1974).
15. Обридко В.Н., *Солнечные данные* **3**, 101 (1979).
16. Обридко В.Н., *Солнечные пятна и комплексы активности* (М.: Наука, 1985).
17. Риммель (T.R. Rimmel), *Astrophys. J.* **490**, 458 (1997).
18. Риммель (T.R. Rimmel), *Astrophys. J.* **672**, 684 (2008).
19. Руппе ван дер Вурт и др. (Roupe van der Voort, L.R. Bellot Rubio, and A. Ortiz), *Astrophys. J. Lett.* **718**, L78 (2010).
20. Рюди и др. (I. Rüedi, S.K. Solanki, and W. Livingston), *Astron. Astrophys.* **302**, 543 (1995).
21. Соланки (S.K. Solanki), *Astron. Astrophys. Rev.* **11**, 153 (2003).
22. Спрют, Шармер (H.C. Spruit and G.B. Scharmer), *Astron. Astrophys.* **447**, 343 (2006).
23. Томас, Вайс (J.H. Thomas and N.O. Weiss), *Sunspots and starspots* (Cambridge Univer. Press, 2008).
24. Фелипе и др. (T. Felipe, M. Collados, E. Khomenko, C. Kuckein, R.A. Asensio, H. Balthasar, T. Berkefeld, C. Denker, et al.), *Astron. Astrophys.* **596**, A59 (2016).
25. Фирстова Н.М., Григорьев В.М., *Исслед. по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца* **20**, 185 (1971).