

УДК 523.985.3

У. М. Лейко¹, Н. Н. Кондрашова²

¹Астрономическая обсерватория
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
ул. Обсерваторная 3, Киев, 04053
leikoum@ukr.net

²Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03143
kondr@mao.kiev.ua

Двойственные хромосферные потоки в окрестности солнечной поры

На основе спектрополяриметрических наблюдений на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS (о. Тенерифе, Испания) изучены хромосферные лучевые скорости в маленькой поре и ее окрестностях на участке активной области NOAA 11024 размером 5'. Для исследования использованы H α -спектры активной области и невозмущенной атмосферы для сравнения. Выявлены значительные изменения лучевой скорости со временем. В начале наблюдений изучаемый участок состоял из двух областей разнонаправленных потоков. В одной из областей, включающей яркую точку в окрестности поры, поток был восходящим, а во второй, включающей пору, нисходящим. Через 2.7 мин после начала наблюдений в обеих областях появились потоки противоположного направления. На участке активной области длиной 2 Мм наблюдались два разнонаправленных потока в одних и тех же элементах разрешения, так называемые двойственные потоки. Размер занятой ими области быстро изменялся. Область смещалась в направлении поры. Скорость восходящих и нисходящих потоков достигала 25 км/с. Нисходящий поток в первой области продолжался всего около минуты. Восходящие движения во второй области постепенно охватывали пору и наблюдались в течение 2 мин. Полученное распределение поля скоростей может быть следствием выхода нового маломасштабного магнитного потока.

ПОДВІЙНІ ХРОМОСФЕРНІ ПОТОКИ В ОКОЛІ СОНЯЧНОЇ ПОРИ,
Лейко У. М., Кондрашова Н. М. — На основі даних спектрополяриметричних спостережень на франко-італійському сонячному телескопі THEMIS (о. Тенеріфе, Іспанія) досліджено хромосферні проме-

неві швидкості у маленькій порі і її околі на ділянці активної області NOAA 11024 розміром $5''$. Для дослідження використано H α -спектри активної області і незбуреної атмосфери для порівняння. Виявлено значні зміни променевої швидкості з часом. На початку спостережень досліджувана ділянка складалась із двох областей різноспрямованих потоків. В одній з областей, яка включала яскраву точку в околі пори, потік був висхідним, а у другій, яка включала пору, — низхідним. Через 2.7 хв після початку спостережень в обох областях з'явилися потоки протилежного напрямку. На ділянці активної області довжиною 2 Мм спостерігалися два різноспрямовані потоки в одних і тих же елементах розділення, так звані подвійні потоки. Розмір зайнятої ними ділянки швидко змінювався. Швидкість низхідних і висхідних потоків досягала 25 км/с. Низхідний потік у першій області тривав лише близько хвилини. Висхідні рухи у другій області поступово охоплювали пору і спостерігались 2 хв. Отриманий розподіл поля швидкостей може бути наслідком виходу нового маломасштабного магнітного потоку.

DUAL CHROMOSPHERIC FLOWS IN THE SURROUNDINGS OF A SOLAR PORE, by Leiko U. M., Kondrashova N. N. — Chromospheric line-of-sight velocities in a small solar pore and its surroundings in a region of size $5''$ are studied. The spectropolarimetric observations were carried out with the French-Italian THEMIS telescope of the Instituto de Astrofisica de Canarias (Spain, Tenerife). We use H α -spectra of the active region NOAA 11024 and the spectrum of the quiet region for a comparison. Strong variations of line-of-sight velocity are revealed. At the beginning of the observations there were flows of different direction in two areas of the region under consideration. The first area included a bright point in the vicinity of the pore, and the second region covered the pore. There were the upflows in the first region and the downflows in the second one. 2.7 min after the beginning of the observations flows of the opposite direction appeared in both areas. Two distinct velocities within the same spatial resolution elements were observed in the region in length 2 Mm, the so-called dual flows. The size of the area occupied by the dual flows changed quickly. The region shifted in the direction of the pore. The velocity of the flows reached of ± 25 km/s. Downflow in the first region lasted about one minute. Upward movement in the second region was gradually covered the pore and continued to the end of the observations. The resulting distribution of the velocity field can be due to a new small-scale magnetic flux emergence.

ВВЕДЕНИЕ

Активные процессы на Солнце характеризуются значительными изменениями поля скоростей в атмосфере. Такие изменения могут быть связаны с перестройкой структуры магнитного поля, локальны-

ми магнитными полями, выходом новых магнитных потоков. Важным направлением является исследование поля скоростей в пятнах и их окрестностях.

Изучению движений в области солнечных пор и пятен посвящено множество работ. В некоторых из них было обнаружено, что на небольших участках активных областей профили линий, образующихся в хромосфере и переходном слое между хромосферой и короной, имеют два и более компонента, свидетельствующих о наличии нескольких потоков [4, 5, 18, 19, 25, 26, 33]. Так, в работе [25] описано необычное изменение триплета He I 1083 нм при наблюдениях активного флоккула в окрестности пятна с помощью немецкого башенного телескопа VTT. Выявлено, что на небольшом участке исследуемой области в течение нескольких минут, линия расщеплялась на два компонента. Один из них представлял собой обычный профиль поглощения. Измеренная скорость оказалась небольшой и близкой к величине для невозмущенного участка Солнца. Вторым компонентом показал большие сдвиги в длинноволновую часть спектра, свидетельствующие о нисходящих потоках со скоростями, достигающими 42 км/с. Авторы рассмотрели несколько сценариев такого явления. Они предполагают, что потоки с разными скоростями разделены в пространстве по лучу зрения. Впоследствии это явление наблюдалось неоднократно [2, 3, 8, 9, 22, 32 и др.]. В работе [8] введено понятие двойственных потоков (dual flows) в случае, когда в одном и том же элементе пространственного разрешения наблюдаются два компонента профиля линии. Авторы работы наблюдали нисходящие потоки в пятнах со сверхзвуковой скоростью, достигавшей 40...80 км/с, в области протяженностью всего в 4...6 . Согласно [9] подобные движения наблюдаются не во всех пятнах. Восходящие потоки в этой же области имели меньшие скорости (5...20 км/с). В переходной области скорость нисходящих потоков может достигать 200 км/с.

Двойственные потоки как в верхней, так и в нижней хромосфере в области активного флоккула в окрестности пятна наблюдались в течение нескольких минут одновременно в линиях He I 1083 нм и H в работе [33]. Размер области, занятой ими, составлял 5 , скорость нисходящих потоков в верхней хромосфере достигала 42 км/с. Скорость, измеренная по второму компоненту профилей линий, была невелика. В работе [22] были построены карты лучевых скоростей в верхней хромосфере активной области NOAA 9451 и выявлены нисходящие потоки со скоростью до 40 км/с в окрестности развивающейся поры в подножии магнитной аркады петель. Эти потоки сопровождался компонентом с малой скоростью в одном и том же элементе разрешения. Со временем площадь, занятая нисходящими потоками, увеличивалась. Выявленные особенности хромосферных движений авторы связывают с выходом нового магнитного потока. Магнитный поток выносит наружу фотосферное вещество, которое затем стекает вниз по поднимающимся петлям. Большие скорости авторы работы [22] объясняют разницей газового давления над порой и в окружающей сре-

де. Низкое давление газа препятствует торможению опускающегося вещества. Авторы указывают на возможную волокнистую структуру нисходящих потоков в виде тонких магнитных силовых трубок с разным наклоном вектора магнитного поля в полутени пятна. По их мнению, возможна также подобная облаку структура с разными скоростями в двух атмосферных слоях. Разные компоненты могут быть расположены на разных высотах вдоль луча зрения.

Двойственные потоки наблюдались и в других явлениях на Солнце: вспышках [30, 36], активных волокнах [28, 31], в основаниях волокнистых структур [14]. В работах [2, 3] сообщается о неоднократных наблюдениях таких потоков в верхней хромосфере активных и невозмущенных областей.

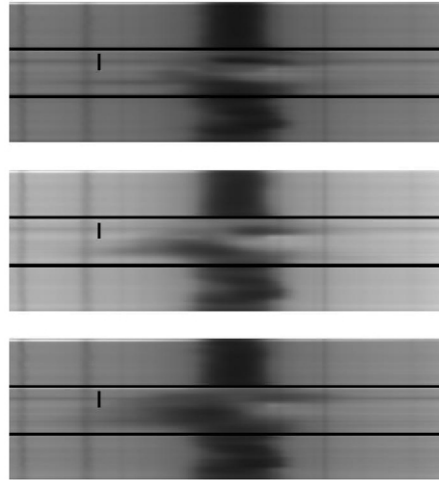
В работах [1, 23] на основе данных спектрополяриметрических наблюдений в линии H на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS мы изучали предвспышечные изменения хромосферной лучевой скорости во флоккуле в окрестности поры в активной области NOAA 11024. В этой области наблюдался восходящий поток, его скорость быстро изменялась со временем. За 12 мин до начала вспышки на внешнем краю флоккула появился нисходящий поток, и в течение одной минуты в одном элементе разрешения наблюдались разнонаправленные (двойственные) потоки. В данной работе детально исследованы эти потоки на расширенном участке, включающем пору и ее окрестности.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Активная область NOAA 11024 появилась на диске Солнца 29 июня 2009 г. в виде факельной площадки и быстро развивалась в биполярную группу пятен, усложнялась ее магнитная структура. Согласно [13, 38, 39] в ней происходил быстрый выход магнитного потока на больших и малых масштабах, что вызвало большое количество слабых вспышек, транзиентов, выбросов и других активных явлений. На фильмограммах в линии H видны фибриллы, обычно наблюдающиеся в молодых развивающихся активных областях. В день наблюдений на солнечном горизонтальном телескопе THEMIS, 4 июля, группа пятен находилась вблизи центрального меридиана. В щель спектрографа попадал центральный участок активной области, находившийся в области инверсии полярностей магнитного поля.

Ширина щели спектрографа была равной 0.5 . Из нескольких временных серий наблюдений с фиксированной щелью для данной работы выбрана серия, которая началась в $11^h 47^m 12^s$ UT. Интервал времени между отдельными спектрами составлял 2.84 с, время накопления сигнала — 0.12 с. Один пиксель занимал 0.2 , но реальное пространственное разрешение составляло около 1 . Детальное описание наблюдений, магнитограмма и изображение в белом свете изучаемой активной области и положение щели спектрографа приведены в работе [20].

Рис. 1. Спектрограммы линии H α , полученные на телескопе THEMIS 4 июля 2009 г. в 11^h47^m55^s, 11^h50^m00^s и 11^h51^m42^s UT. Спектральный участок охватывает область длин волн $\lambda = 656...656.7$ нм. Изучаемая часть активной области отмечена вертикальной линией



Для изучения движений в хромосфере активной области использованы H α -спектры, полученные с 11^h47^m12^s по 11^h52^m. Спектры отображают значительные быстрые изменения, происходившие в хромосфере исследуемого участка активной области в течение наблюдений. Некоторые из спектральных изображений показаны на рис. 1. Поле зрения телескопа THEMIS состоит из трех частей размером по 16 \times 16 пикселей. На рисунке они разделены горизонтальными линиями. Изучаемая часть активной области протяженностью 5 пикселей отмечена вертикальной линией. Она содержит 24 пикселя, первый пиксель соответствует нижнему краю вертикальной линии на рис. 1. Этот участок включает пору, темное образование над ней, окружающие пору флоккулы и яркую точку. На спектрах, полученных в начале наблюдений в течение примерно 2 мин, темное образование видно в центре линии H α . Оно наклонное, что может свидетельствовать о вихревом характере движений в нем [40]. Впоследствии наклон уменьшился и исчез. В течение наблюдений это образование смещалось по спектру в длинноволновую сторону. По-видимому, конденсация холодного вещества постепенно опускалась в нижние слои атмосферы. Из рисунка видно, что отдельные джетоподобные струи ниже рассматриваемого нами участка активной области на спектре, полученном в 11^h47^m55^s, постепенно эволюционировали в более широкую волокнистую структуру. Возможно, так проявлялся выход арочной волокнистой системы (Arch Filament System — AFS) [6, 7, 34, 41].

На рис. 2 показаны изменения интенсивности поперек дисперсии в центре линии H α , ее голубом и красном крыльях вдоль разреза активной области щелью в 11^h47^m55^s UT. Вертикальными сплошными линиями отмечены границы исследуемого участка АО: левая линия соответствует пикселю 1, правая — пикселю 24. Яркая точка занимает пиксели 1...5 (область I на рис. 2), пора — 10...18 (область II). Темное образование занимало область поры и ее ближайшие окрестности (пиксели 7...20). Пиксели 21...24 (область III) относятся к флоккуле над порой на спектрограммах (рис. 1).

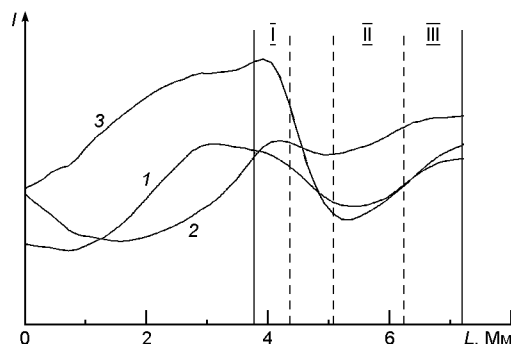


Рис. 2. Изменение интенсивности I в условных единицах вдоль разреза активной области в центре линии H (кривая 1), в ее коротковолновом (2) и длинноволновом (3) крыльях на расстоянии 0.068 нм от центра линии в $11^h47^m55^s$ UT. Вертикальными сплошными линиями отмечены границы исследуемого участка АО: левая линия соответствует пикселю 1, правая — пикселю 24. Цифры I, II и III отмечают области яркой точки, поры и флоккула соответственно, штриховыми линиями отмечены границы между ними

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИИ H В ОБЛАСТИ ДВОЙСТВЕННЫХ ПОТОКОВ

Анализ профилей Стокса I линии H , полученных для разных пикселей рассматриваемого участка, показал, что они значительно отличаются от профиля для невозмущенной атмосферы и очень сильно различаются между собой. На рис. 3 приведены профили линии для нескольких пикселей для момента $11^h47^m55^s$ и для участка невозмущенной атмосферы вне этой области для сравнения. Цифрами указаны номера пикселей: 3 относится к яркой точке, 14 — к центру поры, 7 и 21 — к окрестностям поры. Профили линии в разной степени ослаблены и смещены в спектрах по сравнению с профилем для невозмущенного участка Солнца. Центральная часть профилей линии в пикселях, занимаемых яркой точкой, смещена в коротковолновую область спектра. Профили ослаблены, что указывает на прогрев области формирования ядра линии. В их красном крыле имеется дополнительная эмиссия, наиболее выраженная в пикселе 3. В области поры, темного образования и флоккуле в окрестности поры центральная часть профилей линии смещена в длинноволновую часть спектра. Профили линии расширены. Далекое голубое крыло всех профилей в целом мало изменено относительно профиля для невозмущенной атмосферы. В пикселях 1...4 в голубом крыле имеется компонент, указывающий на наличие в этой области дополнительного восходящего потока.

Сдвиги ядер профилей линии указывают на существование двух областей с разнонаправленными потоками. В области, включающей яркую точку (пиксели 1...6), были восходящие потоки, а в области поры, темного образования и флоккула — нисходящие (пиксели 9...24). На границе между этими областями скорости малы (пиксели 7, 8).

На рис. 4 показаны профили линии H для пикселей 2, 4, 7, 10 в более поздние моменты времени $11^h49^m40^s$ и $11^h50^m00^s$. Можно отметить значительные изменения в их голубом крыле относительно профиля для невозмущенного участка и профилей линии на рис. 3 для начала наблюдений, увеличилось поглощение. В целом характер изменения сдвигов ядер профилей линии в спектрах от пикселя к пиксе-

Рис. 3. Профили линии Н для разных пикселей в $11^h47^m55^s$ UT. Цифрами указаны номера пикселей: 3 — яркая точка, 14 — пора, 7, 21 — окрестности поры, НА — невозмущенная атмосфера

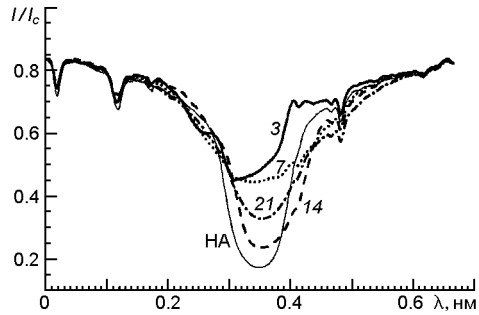
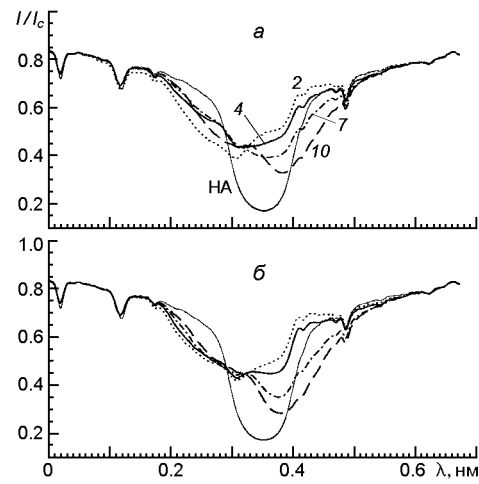


Рис. 4. Профили линии Н для разных пикселей в $11^h49^m40^s$ (а) и $11^h50^m00^s$ (б). Цифрами указаны номера пикселей: 2, 4 — яркая точка, 7 — окрестность поры, 10 — пора, НА — невозмущенная атмосфера



лю таков же, как и на рис. 3. Профили линии для яркой точки смещены в коротковолновую область спектра, а при приближении к поре центральная часть профилей постепенно смещается в длинноволновую часть спектра.

Изменения профилей от пикселя к пикселю в голубом крыле невелики. Некоторые профили имеют сложную форму, значительно расширены. Следует отметить, что все профили в $11^h49^m40^s$ — однокомпонентные, а в $11^h50^m00^s$ в ядре профиля для пикселя 4 выделяются два компонента. Также в красном крыле профиля линии для пикселя 2 в оба момента имеется особенность, которую можно связать с появлением второго компонента.

В течение наблюдений профили линии Н сильно изменялись (рис. 3—6). На рис. 5 показано изменение профилей линии для одних и тех же пикселей (4 — яркая точка, 6 — окрестность поры, 14 — пора) со временем. Видно, как сильно изменяется форма профилей линии, ее интенсивность со временем.

В $11^h47^m55^s$ ядро профилей линии для пикселей 4, 6 смещено в спектре в сторону коротких длин волн (рис. 5, а, б). Примерно через 2.7 мин после начала наблюдений ядро линии разделилось на два компонента. В $11^h50^m00^s$ профили линии состоят уже из двух компонентов: один из них смещен в сторону коротких волн, а другой находится в красном крыле линии, что указывает на наличие в хромосфере двух потоков, восходящего и нисходящего, так называемых двойственных

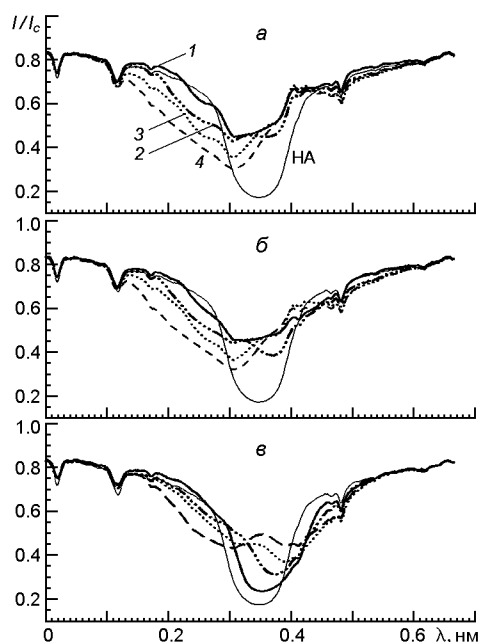


Рис. 5. Изменение профилей линии Н активной области со временем для пикселей 4 (а), 6 (б) и 14 (в). Профиль 1 получен в $11^h47^m55^s$, 2 — в $11^h50^m00^s$, 3 — в $11^h50^m51^s$, 4 — в $11^h51^m42^s$; НА — профиль для невозмущенной атмосферы

потоков. В пикселе 4 преобладает голубой компонент, а в пикселе 6, ближе к поро, — красный. Этот компонент исчез в $11^h51^m00^s$, и в последующие моменты в этих пикселях наблюдался один голубой компонент. Красный компонент наблюдался всего примерно 1 мин.

Профили линии для поры (рис. 5, в) смещены в длинноволновую сторону спектра. Со временем сдвиг увеличивался,

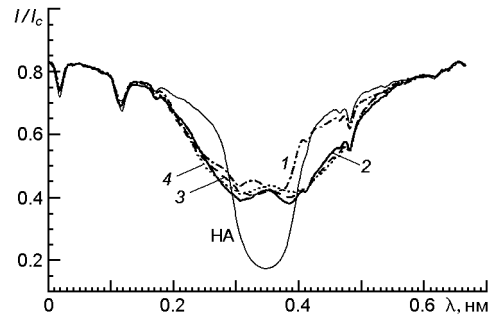
что свидетельствует об увеличении скорости нисходящего потока. С $11^h49^m54^s$ появилась голубая асимметрия профилей, а в $11^h50^m42^s$ в голубом крыле линии выделился второй компонент. В $11^h51^m42^s$ отчетливо видны два компонента профиля. На внутреннем краю поры (нижнем на рис. 1) голубой компонент в линии появился еще раньше, примерно в $11^h50^m00^s$, на внешнем краю — позже. Увеличение сдвигов ядер компонентов и уширение профилей к концу рассматриваемого интервала времени свидетельствует об увеличении скоростей двойственных потоков. Можно отметить постепенное ослабление красного и усиление голубого компонентов профилей линии со временем, особенно сильное в $11^h51^m42^s$. К концу рассматриваемого периода преобладал голубой компонент.

На рис. 6 показаны профили линии с примерно одинаковыми по интенсивности двумя компонентами для разных сечений и моментов времени. Из него видно, что область, где интенсивность компонентов линии была одинаковой, со временем смещалась в сторону поры и постепенно охватила всю пору.

ХРОМОСФЕРНЫЕ ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ ДВОЙСТВЕННЫХ ПОТОКОВ

В настоящей работе рассмотрено изменение хромосферных лучевых скоростей в период от начала спектральных наблюдений на телескопе THEMIS с 11^h47^m до 11^h52^m . Лучевые скорости определялись по доплеровским смещениям ядра линии Н в спектрах относительно их положений в лабораторном спектре [29] с использованием близлежащих теллурических линий. При этом учтены поправки за вращение Земли, обращение Земли вокруг Солнца, красное смещение. В случае,

Рис. 6. Профили линии Н с двумя примерно одинаковыми компонентами для разных пикселей и разных моментов времени: 1 — для пикселя 5 в $11^h50^m00^s$, 2 — для пикселя 10 в $11^h50^m51^s$, 3 — для пикселя 13 в $11^h51^m28^s$, 4 — для пикселя 19 в $11^h51^m42^s$; НА — профиль для невозмущенной атмосферы



когда в линии имеются два компонента, измерялись сдвиги их ядер. Положение ядра отдельного компонента находилось по бисектору самой нижней части профиля. Скорости определены только для тех профилей, где имеется отчетливое разделение компонентов. Ошибка измерения скорости составляет 0.3 км/с, но в случае сложной формы профиля линии могла увеличиваться до 0.7 км/с.

Как уже отмечено, в начале наблюдений на исследуемом участке активной области имелись две области с разнонаправленными потоками. Первая область включала яркую точку, в ней поток был восходящим. Вторая область с нисходящим потоком охватывала пору, темное образование, видимое на спектрах в ядре линии Н, и флоккул в окрестности поры. В области яркой точки происходило значительное изменение со временем скорости движения вещества. В течение 43 с скорость восходящего потока резко увеличилась от малых значений до 11...15 км/с к $11^h47^m55^s$ UT. Затем скорость уменьшилась до 6...12 км/с, и далее испытывала колебания. Через 2.7 мин после начала наблюдений, в $11^h49^m54^s$, в пикселях 4...6, относящихся к первой области, в центре линии Н появились два компонента, соответствующих восходящему и нисходящему потокам. Впоследствии скорость нисходящего потока резко увеличивалась от 2 до 15 км/с, а скорость восходящего потока оставалась постоянной в пределах 17...18 км/с.

Таким образом, в области яркой точки наблюдались два разнонаправленных потока в каждом элементе разрешения, так называемые двойственные потоки. Красный компонент наблюдался в линии всего примерно одну минуту и исчез в $11^h51^m00^s$.

Во второй области (пора, темное образование, флоккул) вначале наблюдались нисходящие потоки со скоростями 4...9 км/с. В отличие от первой области, больших изменений скорости не было. Примерно в $11^h49^m54^s$ в этой области появился восходящий поток, и затем в ней наблюдались двойственные потоки, скорость которых затем увеличивалась. Нисходящий поток постепенно исчезал, начиная от нижнего края поры, а восходящий поток наблюдался во всей этой области до конца рассматриваемого интервала времени.

Таким образом, двойственные потоки наблюдались в обеих областях примерно с $11^h49^m54^s$ UT. Они охватывали сначала очень маленький участок активной области (рис. 7). Протяженность этого участка в момент появления двух компонентов в линии составляла всего

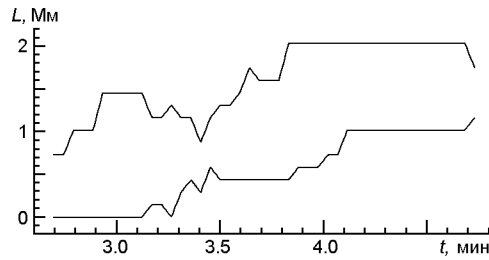
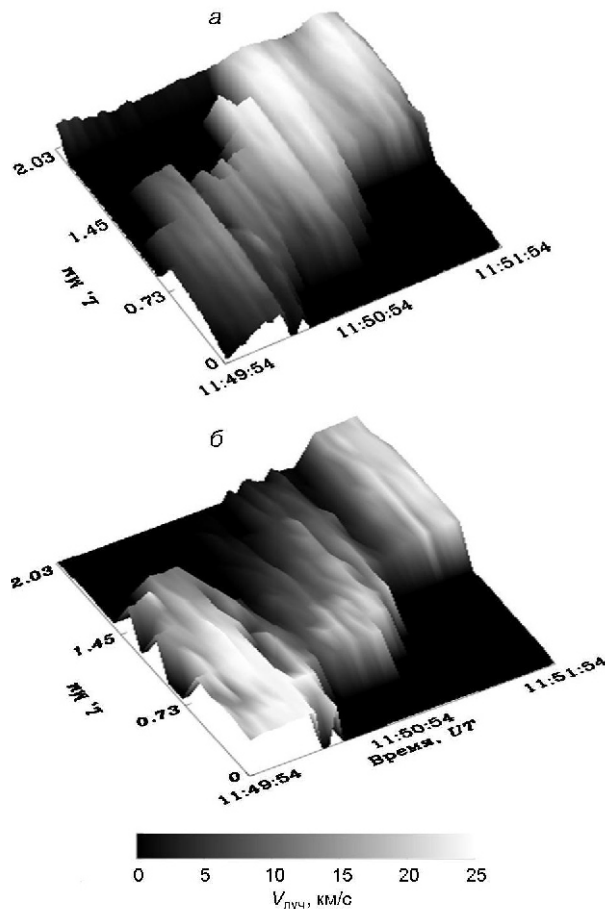


Рис. 7. Изменение со временем длины области двойственных потоков. Время отсчитано от момента начала наблюдений $11^h 47^m 12^s$ UT

0.7 Мм. Затем этот участок быстро расширялся и смещался. К $11^h 50^m 00^s$ он увеличился до 1 Мм, а к $11^h 50^m 51^s$ — до 1.5 Мм. Со временем этот участок смещался в сторону поры, размер его изменялся, и постепенно он занял область поры и темного образования. Под конец рассматриваемого интервала времени длина области двойных потоков резко уменьшилась.

Рис. 8 показывает изменение во времени вдоль щели спектрографа лучевых скоростей нисходящего и восходящего потоков. Видно, что область двойственных потоков смещалась, ее размер изменялся. Наибольшие значения скоростей нисходящих потоков наблюдались в области поры и темного образования во второй половине рассматриваемого интервала времени. Восходящие потоки имели наибольшие скорости в области яркой точки в начале наблюдений. Скорость разнонаправленных потоков изменялась со временем и достигала 25 км/с. Наблюдаются значительные ее колебания.



На рис. 9, 10 показаны изменения со временем скоростей двойственных восходящих и нисходящих потоков для отдельных пикселей в яркой точке, окрестности поры и поре. Из рис. 9 видно, что в области яркой точки (пиксели 4...6) после появления нисходящих

наблюдений. Скорость разнонаправленных потоков изменялась со временем и достигала 25 км/с. Наблюдаются значительные ее колебания.

Рис. 8. Изменение со временем лучевой скорости нисходящего (а) и восходящего (б) потоков. Скорости приведены в абсолютных величинах

Рис. 9. Изменение лучевых скоростей нисходящих потоков в яркой точке (а), в окрестности поры (б) и в поре (в). Время отсчитывается от начала наблюдений в $11^h47^m12^s$. Для сравнения приведено изменение скорости вне области двойственных потоков (пиксель 24)

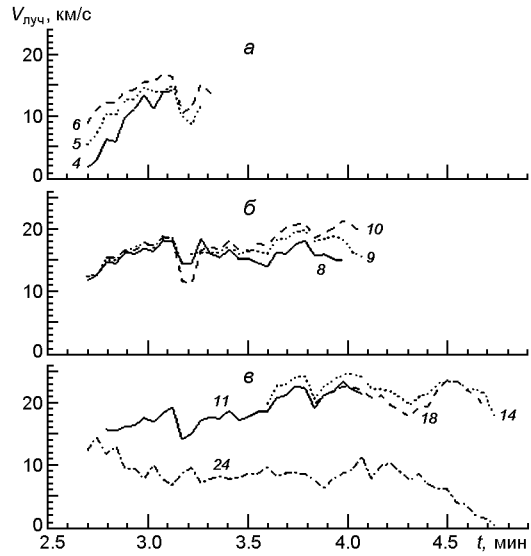
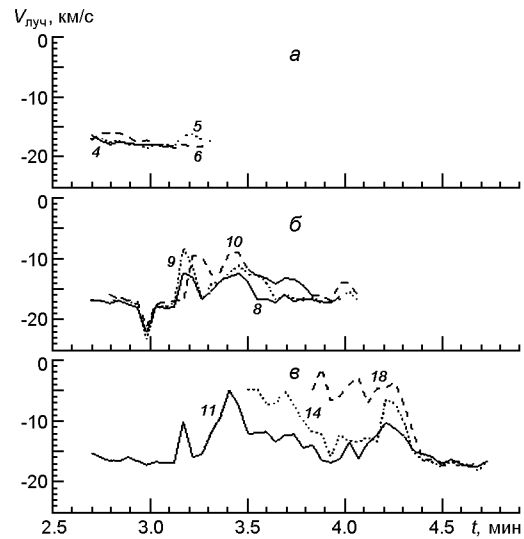


Рис. 10. То же для восходящих потоков



потоков их скорость резко увеличивалась от 2...9 до 13...17 км/с в течение 24 с. Примерно через 0.5 мин произошел скачок скорости, она уменьшилась на несколько км/с и снова увеличилась. Интересно, что подобный скачок скорости также имел место и для других пикселей (рис. 9). Скорость восходящих потоков оставалась почти постоянной 17...18 км/с. Нисходящий поток наблюдался всего 43 с. Продолжительность двойственных потоков для соседних пикселей 8, 9, 10, ближе к поре, была больше. Скорость нисходящих потоков после их появления вначале также увеличивалась, но менее резко. Скорость восходящих потоков мало изменялась. Примерно через 0.3 мин скорость восходящих и нисходящих движений испытывала колебания, то уменьшаясь, то увеличиваясь. Область двойственных потоков постепенно смещалась к поре. Восходящие движения постепенно охватывали область поры, где ранее наблюдались нисходящие потоки (пиксели 11, 14, 18 на рис. 10). Примерно через 3.8 мин после начала на-

блюдений они достигли внешнего края поры (пиксель 18). Скорость нисходящих потоков постепенно увеличивалась на фоне ее колебаний, достигая 25 км/с. Наблюдались также резкие колебания скорости восходящих потоков. На рис. 9 приведено изменение скорости нисходящего потока для пикселя 24 вне участка двойных потоков. Скорость имела тенденцию к уменьшению со временем.

ОБСУЖДЕНИЕ

В наших предыдущих работах [1, 23] для рассматриваемого периода времени определены хромосферные лучевые скорости на высотах формирования ядра линии H в области флоккула в центре спектров, приведенных на рис. 1. Следует отметить, что в $12^h03.5^m$ в этом месте произошла микровспышка рентгеновского балла В3, которая продолжалась около 2 мин. Лучевая скорость в этой области быстро изменялась. В течение первой минуты наблюдений происходил подъем хромосферного вещества, причем скорость восходящего потока резко увеличивалась со временем от 7 до 18 км/с. В течение второй минуты скорость мало изменялась, а затем произошел скачок скорости. Она уменьшилась, затем резко увеличилась, после чего в ее временном ходе наблюдались колебания (рис. 2 в работе [1]). В $11^h49^m54^s$ на внешнем краю флоккула (пиксели 4...6 данной работы) появился нисходящий поток, и в течение примерно одной минуты наблюдались разнонаправленные потоки. В настоящей работе это явление двойственных потоков исследовано детально. Выделен участок, на котором профили линии H имели два компонента, и для них рассчитаны лучевые скорости. В результате получена следующая картина распределения поля скоростей на этом участке и его изменения со временем.

В начале наблюдений на рассматриваемом нами участке активной области NOAA 11024 размером 5 имелись две области разнонаправленных потоков: восходящего и нисходящего. Первая область включала яркую точку, а вторая — пору, темное образование над ней в хромосфере и флоккул. В первой области поток был восходящим, а во второй — нисходящим. Скорость восходящего потока быстро изменялась, сначала менее чем за минуту увеличилась до сверхзвуковой, затем уменьшилась и испытывала колебания. Изменения скорости в области нисходящего потока были невелики. Через 2.7 мин после начала наблюдений в обеих областях появились потоки противоположного направления. Нисходящий поток наблюдался в первой области всего около минуты. Восходящие движения постепенно охватывали пору и продолжались до конца рассматриваемого интервала времени. Область двойственных потоков со временем смещалась, изменялся ее размер.

Как отмечено ранее, двойственные потоки наблюдаются в хромосфере, переходной области между хромосферой и короной в окрестностях пор и пятен, во вспышках, флоккулах, волокнах, в подножиях аркад петель и в невозмущенной атмосфере. Нисходящие потоки в об-

ласти размером в несколько угловых секунд имеют сверхзвуковую скорость. Их происхождение до сих пор остается непонятным. Механизмы, которые могут их объяснить, рассмотрены, например, в работах [10, 15, 22, 25, 27, 33, 37]. В модели сифонного потока предполагается, что поток движется по магнитной петле из области высокого давления к области низкого. Скорость увеличивается при движении по восходящей ветви петли, а в нисходящей ее части дополнительно увеличивается с образованием фронта ударной волны [10, 25]. Так, в работе [37] наблюдавшийся близко к краю поры сверхзвуковой нисходящий поток в хромосфере интерпретируется как сифонный поток вдоль магнитной петли, соединяющей участок более слабого поля с порой противоположной полярности в той же активной области. В работах [11, 12, 35] наблюдаемые в переходном слое сверхзвуковые нисходящие потоки интерпретируются как сифонные потоки. Сифонный поток может приводиться в движение при импульсном нагреве одного из подножий петли [12]. В качестве другого триггерного механизма рассматриваются акустические волны, генерируемые в короне нановспышками [16, 17] и распространяющиеся вниз в переходную область. В ряде работ [15, 25, 33] для объяснения нисходящих потоков привлекается теория конвективного коллапса Паркера [27]. В работе [24] отмечается, что доплеровские сдвиги линий, формирующихся в верхней атмосфере Солнца, которые обычно связывают со взрывными событиями или джетам с разными направлениями струй, на самом деле могут относиться к кратковременным потокам в мелкомасштабных петлях.

Некоторые особенности эволюции активной области NOAA 11024 и проявления выхода магнитных потоков больших и малых масштабов рассмотрены в работах [21, 38, 39]. Согласно работе [38] 4 июля 2009 г., в день наблюдений на телескопе THEMIS была главная фаза выхода магнитного потока. «Змеевидное» магнитное поле появлялось в виде небольших биполярных фрагментов между основными полярностями. Появившиеся змеевидные силовые линии взаимодействовали с крупномасштабным магнитным полем активной области. Методом нелинейной экстраполяции бессилового коронального магнитного поля были найдены места возможных магнитных пересоединений. На изображениях в линиях Si VII и Fe XII, полученных с помощью УФ-спектрометра на спутнике «Hinode» (Hinode/EUV Imaging Spectrometer), в центре активной области с $11^{\text{h}}52^{\text{m}}26^{\text{s}}$ по $11^{\text{h}}55^{\text{m}}52^{\text{s}}$ UT видна сильная эмиссия (рис. 4 из работы [38]). С $12^{\text{h}}13^{\text{m}}55^{\text{s}}$ по $12^{\text{h}}29^{\text{m}}44^{\text{s}}$ UT в короне и переходной области зарегистрированы двойственные потоки со скоростями ± 20 км/с. Авторы предполагают, что эти потоки появились в результате магнитного пересоединения силовых линий крупномасштабного и мелкомасштабного магнитных полей в короне. В работе [21] сообщается о наблюдениях хромосферных нисходящих потоков со скоростями до 18 км/с в зоне выходящего магнитного потока в окрестностях быстро развивающейся поры. В работе [39] обнаружены темные особенности на фильтрограммах в

линии Ca II H, продолжительность которых составляла примерно 12 мин, а максимальная длина 2...4 Мм. Появление этих особенностей авторы связывают с эпизодами выхода магнитных потоков масштаба гранул. Они исследовали три таких эпизода, но предполагают, что их было значительно больше. Возможно, полученные нами изменения лучевой скорости являются следствием выхода нового маломасштабного магнитного потока.

ВЫВОДЫ

В данной работе на основе спектрополяриметрических наблюдений с высоким пространственным и временным разрешением на франко-итальянском солнечном телескопе THEMIS изучены движения хромосферного вещества на участке активной области NOAA 11024 размером 5 в маленькой поре и ее окрестностях, включая яркую точку и темное хромосферное образование над порой. В начале наблюдений этот участок состоял из двух областей потоков. В области яркой точки движения вещества были восходящими, а в области поры — нисходящими. Скорость восходящих движений быстро и значительно изменялась, изменение скорости нисходящих потоков было невелико. Примерно через 2.7 мин после начала наблюдений в окрестности поры, где вначале наблюдались восходящие движения, появился новый, нисходящий поток. В области поры, где сначала наблюдались нисходящие движения, возник восходящий поток. В результате в области небольшого размера примерно 2 Мм в течение двух минут наблюдались два разнонаправленных потока в одних и тех же элементах разрешения, так называемые двойственные потоки. Скорости потоков достигали ± 25 км/с. Поскольку в изучаемой активной области в день наблюдений происходил основной выход магнитного потока на малых и больших масштабах, можно предположить, что полученное распределение поля скоростей может быть следствием выхода нового маломасштабного магнитного потока. Необходимо дальнейшее исследование этого участка с привлечением данных, которые позволят исследовать особенности изменений магнитного поля.

Авторы благодарят Е. В. Хоменко и группу поддержки телескопа THEMIS за спектрополяриметрические наблюдения и Р. И. Костыка за предоставленные программы.

1. Лейко У. М., Кондрашова Н. Н. Изменения хромосферной лучевой скорости в солнечной микровспышке // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2013.—109, № 3.—С. 72—77.
2. Aznar Cuadrado R., Solanki S. K., Lagg A. Supersonic downflows in the solar chromosphere are very common // Proceedings of the International Scientific Conference on Chromospheric and Coronal Magnetic Fields (30 August — 2 September 2005, Katlenburg-Lindau, Germany) / Eds D. E. Innes, A. Lagg, S. K. Solanki, D. Danesy. — ESA Publ. Division, 2005.—Vol. 596.—Publ. on CDROM, id. 49.1.
3. Aznar Cuadrado R., Solanki S. K., Lagg A. Velocity distribution of chromospheric downflows // Modern solar facilities — advanced solar science: Proc. Workshop

- held at Göttingen, September 27-29, 2006 / Eds F. Kneer, K. G. Puschmann, A. D. Wittmann. — Göttingen: Universitätsverlag, 2007.—P. 173—176.
4. Brekke P., Brynildsen N., Kjeldseth-Moe O., et al. Multiple flow velocities in the transition region // *Adv. Space Res.*—1991.—**11**, N 5.—P. 251—254.
 5. Brekke P., Kjeldseth-Moe O., Brueckner G. E. Multiple downflow velocities above sunspots // *Astrophys. and Space Sci.*—1990.—**170**, N 1-2.—P. 135—140.
 6. Bruzek A. On arch-filament systems in spotgroups // *Solar Phys.*—1967.—**2**, N 4.—P. 451—461.
 7. Bruzek A. Motions in arch filament systems // *Solar Phys.*—1969.—**8**, N 1.—P. 29—36.
 8. Brynildsen N., Maltby P., Kjeldseth-Moe O., Wilhelm K. Dual flows and oscillations in the sunspot transition region // *Astrophys. J.*—2001.—**552**, N 1.—P. L77—L80.
 9. Brynildsen N., Maltby P., Kjeldseth-Moe O., Wilhelm K. Dual flows with supersonic velocities in the sunspot transition region // *Astrophys. J.*—2004.—**612**, N 2.—P. 1193—1195.
 10. Cargill P. J., Priest E. R. Siphon flows in coronal loops. I. Adiabatic flow // *Solar Phys.*—1980.—**65**.—P. 251—269.
 11. Chitta L. P., Peter H., Young P. R. A closer look at a coronal loop rooted in a sunspot umbra // *Astron. and Astrophys.*—2016.—**587**.—article id. A20.—10 p.
 12. Doyle J. G., Taroyan Y., Ishak B., et al. Study of a transient siphon flow in a cold loop // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**452**, N 3.—P.1075—1082.
 13. Engell A. J., Siarkowski M., Gryciuk M., et al. Flares and their underlying magnetic complexity // *Astrophys. J.*—2011.—**726**, N 1.—article id. 12.—8 p.
 14. Gonzalez Manrique S. J., Kuckein C., Pastor Yabar A., et al. Fitting peculiar spectral profiles in He I 10830 Å absorption features // *Astron. Nachr.*—2016.—**337**, N 10.—P. 1057—1063.
 15. Grossmann-Doerth U., Schüssler M., Steiner O. Convective intensification of solar surface magnetic fields: results of numerical experiments // *Astron. and Astrophys.*—1998.—**337**.—P. 928—939.
 16. Hansteen V. A new interpretation of the redshift observed in optically thin transition region lines // *Astrophys. J.*—1993.—**402**, N 2.—P. 741—755.
 17. Hansteen V., Maltby P. Redshifted transition region lines explained // *Adv. Space Res.*—1994.—**14**, N 4.—P. 57—60.
 18. Kjeldseth-Moe O., Brynildsen N., Brekke P., et al. Gas flows in the transition region above sunspots // *Astrophys. J.*—1988.—**334**, p. 1—P. 1066—1075.
 19. Kjeldseth-Moe O., Brynildsen N., Brekke P., et al. Multiple flows and the fine structure of the transition region around sunspots // *Solar Phys.*—1993.—**145**, N 2.—P. 257—277.
 20. Kondrashova N. N. Spectropolarimetric investigation of the photosphere during a solar microflare // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2013.—**431**, N 2.—P. 1417—1424.
 21. Kondrashova N. N. Pasechnik M. N., Chornogor S. N., Khomenko E. V. Atmosphere dynamics of the active region NOAA 11024 // *Solar Phys.*—2013.—**284**, N 2.—P. 499—513.
 22. Lagg A., Woch J., Solanki S. K., Krupp N. Supersonic downflows in the vicinity of a growing pore. Evidence of unresolved magnetic fine structure at chromospheric heights // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**462**, N 3.—P. 1147—1155.
 23. Leiko U. M., Kondrashova N. N. The chromospheric line-of-sight velocity variations in a solar microflare // *Adv. Space Res.*—2015.—**55**, N 3.—P. 886—890.
 24. Madjarska M. S., Doyle J. G. Small-scale flows in SUMER and TRACE high-cadence co-observations // *Astron. and Astrophys.*—2008.—**482**, N 1.—P. 273—278.
 25. Muglach K., Schmidt W., Knoelker M. Multiple velocities observed in He I 1083 nm // *Solar Phys.*—1997.—**172**, N 1/2.—P. 103—108.
 26. Muglach K., Sütterlin P. Simultaneous observations with the GCT and SOHO: high velocity events in the upper chromosphere // *Second Advances in Solar Physics Euroconference: Three-Dimensional Structure of Solar Active Regions, ASP Conf. Series 1998, 155* / Eds C. E. Alissandrakis, B. Schmieder. — 1998.—P. 341—345.

27. *Parker E. N.* Hydraulic concentration of magnetic fields in the solar photosphere. VI. Adiabatic cooling and concentration in downdrafts // *Astrophys. J.*—1978.—**221**, N 1, Part 1.—P. 368—377.
28. *Penn M. J.* An erupting active region filament: three-dimensional trajectory and hydrogen column density // *Solar Phys.*—2000.—**197**, N 2.—P. 313—335.
29. *Piskunov N. E., Kupka F., Ryabchikova T. A., et al.* VALD: The Vienna atomic line data base // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1995.—**112**, N 3.—P. 525—535.
30. *Sasso C., Lagg A., Solanki S. K., et al.* Full-Stokes observations and analysis of He I 10830 Å in a flaring region // *The Physics of Chromospheric Plasmas ASP Conference Series (Proceedings of the conference held 9—13 October, 2006 at the University of Coimbra in Coimbra, Portugal) / Eds P. Heinzel, I. Dorotovic, R. J. Rutten.* — San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2007.— Vol. 368.—P. 467.
31. *Sasso C., Lagg A., Solanki S. K.* Multicomponent He I 10830 Å profiles in an active filament // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**526**.—article id. A 42.—11 p.
32. *Schad T. A., Jaeggli S. A., Lin H., Penn M. J.* Spectropolarimetry of chromospheric magnetic and velocity structure above active regions // *Solar Polarization 6 (Proceedings of a conference held in Maui, Hawaii, USA on May 30 to June 4, 2010) / Eds J. R. Kuhn, D. M. Harrington, H. Lin, et al.* — San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2011.—Vol. 437.—P. 483—490.
33. *Schmidt W., Muglach K., Knölker M.* Free-fall downflow observed in He I 1083.0 nanometers and H // *Astrophys J.*—2000.—**544**, N 1.—P. 567—571.
34. *Spadaro D., Billotta S., Contarino L., et al.* AFS dynamic evolution during the emergence of an active region // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**425**.—P. 309—319.
35. *Straus T., Fleck B., Andretta V.* A steady-state supersonic downflow in the transition region above a sunspot umbra // *Astron. and Astrophys.*—2015.—**582**.—article id. A116, 11 p.
36. *Teriaca L., Falchi A., Cauzzi G., et al.* Solar and Heliospheric Observatory/Coronal diagnostic spectrograph and ground-based observations of a two-ribbon flare: spatially resolved signatures of chromospheric evaporation // *Astrophys. J.*—2003. —**588**, N 1.—P. 596—605.
37. *Uitenbroek H., Balasubramaniam K. S., Tritschler A.* Evidence for a siphon flow ending near the edge of a pore // *Astrophys. J.*—2006.—**645**, N 1.—P. 776—781.
38. *Valori G., Green L. M., Demoulin P., et al.* Nonlinear force-free extrapolation of emerging flux with a global twist and serpentine fine structures // *Solar Phys.*—2012.—**278**, N 1.—P. 73—97.
39. *Vargas Dominguez S., van Driel-Gesztelyi L., Bellot Rubio L. R.* Granular-scale elementary flux emergence episodes in a solar active region // *Solar Phys.*—2012.—**278**, N 1.—P. 99—120.
40. *Zirin H.* The solar atmosphere. — Waltham: Blaisdell Publ. Co., 1966.—504 p.
41. *Zwaan C.* The emergence of magnetic flux // *Solar Phys.*—1985.—**100**.—P. 397—414.

Статья поступила в редакцию 07.07.16