

УДК 523.9

В. А. Шеминова

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

О происхождении экстремально асимметричных V-профилей Стокса в неоднородной атмосфере

По результатам двухмерного МГД-моделирования солнечной магнитоградуляции исследуется образование V-профилей Стокса, форма которых существенно отличается от обычной. Синтезированные необычные профили по ряду свойств подобны асимметричным профилям, наблюдаемым с пространственным разрешением лучше 1" в активных областях вне солнечных пятен и в спокойных областях сетки и между сеткой. Как и наблюдаемые, они появляются преимущественно группами в областях слабых магнитных полей смешанной полярности вдоль нейтральных линий. Как правило, они располагаются на границах гранул и межгранульных промежутков, а иногда на периферии сильных магнитных трубок, где имеются сильные градиенты скорости и напряженности. Оказалось, что они появляются большими группами в областях, где происходит фрагментация больших гранул и начинаются процессы формирования магнитных трубок. Синтезированные необычные профили могут иметь от одного до шести экстремумов в одном профиле. Природа однопиковых и многопиковых V-профилей одна и та же. Процессы, которые приводят к экстремальной асимметрии, характеризуются переменной полярности магнитного поля вдоль луча зрения один или несколько раз, а также сложными градиентами скорости и напряженности. Чем больше пиков в профиле, тем вероятнее перемена знака градиента напряженности поля. Отсюда следует, что в местах локализации экстремально асимметричных профилей структура магнитного поля должна быть очень сложной. Это подтверждается прямыми результатами моделирования градуляции, которые показывают, что сдвиговые движения на границах сильных нисходящих потоков часто создают вихри и турбулентные движения. Эти процессы усложняют структуру магнитных полей, смешивая их полярности, особенно по углам гранул.

ПРО ПОХОДЖЕННЯ ЕКСТРЕМАЛЬНО АСИМЕТРИЧНИХ V-ПРОФІЛІВ СТОКСА В НЕОДНОРІДНІЙ АТМОСФЕРІ, Шеминова В. А. — За результатами двовимірного МГД-модельовання сонячної магнітоградуляції досліджується утворення V-профілів Стокса, форма яких істотно відрізняється від звичайної. Синтезовані незвичайні профілі за рядом властивостей подібні до асиметричних профілів, що спостерігаються з

просторовою роздільністю, кращою від 1", в активних областях поза сонячними плямами та у спокійних областях сітки й між сіткою. Як і спостережувані, вони з'являються переважно групами в областях слабких магнітних полів змішаної полярності уздовж нейтральних ліній. Як правило, вони розташовуються на границях гранул і міжгранульних проміжків, а інколи на периферії сильних магнітних трубок, де є сильні градієнти швидкості й напруженості. Виявилось, що вони виникають великими групами у місцях, де починаються процеси утворення нових магнітних трубок. Синтезовані незвичайні профілі можуть мати від одного до шести екстремумів в одному профілі. Природа однопикових і багатопикових V-профілів однакова. Головні процеси, які призводять до екстремальної асиметрії, характеризуються одним або кількома реверсами полярності магнітного поля уздовж променя зору, а також градієнтами швидкості й напруженості. Звідси випливає, що у місцях локалізації екстремально асиметричних профілів структура магнітного поля повинна бути дуже складною. Це підтверджується прямими результатами моделювання грануляції, які показують, що шир швидкостей на границях сильних спадних потоків часто створює вихори та турбулентні рухи. Ці процеси ускладнюють структуру магнітних полів, змішуючи їхні полярності, особливо у кутах гранул.

ON THE ORIGIN OF THE EXTREMELY ASYMMETRIC STOKES V PROFILES IN AN INHOMOGENEOUS ATMOSPHERE, by Sheminova V. A. — We investigated the formation of the Stokes V profiles with unusual shape using results of 2-D MHD simulation of solar magnetogranulation. The synthetic unusual profiles have properties in common with those observed with the spatial resolution $< 1''$ in active regions outside sunspots and in the network and internetwork. Like observed profiles they mostly appear in clusters in regions of weak magnetic fields with mixed polarity along the polarity inversion lines. As a rule, they are located at the edges of granules and lanes and sometimes close to strong magnetic field concentrations with strong gradients of velocity and magnetic field strength. It is found that they appear as clusters in the regions of large granules fragmentation, where begins formation of new magnetic fluxtubes. The synthetic unusual profiles can have from one to six lobes. The origin of singlelobed and manylobed profiles are the same. The major processes causing extremely asymmetry are characterized by one or multiple polarity reversals along the line of sight as well as by gradients of velocity and magnetic field strength. The more lobes in a profile, the more probability of sign change of magnetic field gradient. It follows that location regions of extremely asymmetric profiles should have a very complicated structure of magnetic fields on small scales. This is confirmed by straightforward results achieved in granulation simulations which demonstrate that velocity shear at the downdraft edges creates vortices and turbulence. This adds complexity to structure magnetic fields mixing their polarities, in particular at the edges of granules.

ВВЕДЕНИЕ

Профили Стокса магниточувствительных фраунгоферовых линий обычно используются для изучения структуры магнитного поля и движения вещества в различных образованиях на Солнце. Среди них наиболее часто привлекаются V-профили циркулярно поляризованного излучения, которые можно уверенно наблюдать не только в местах сильных магнитных концентраций, но также в областях спокойного Солнца, где преобладают слабые межсеточные магнитные поля.

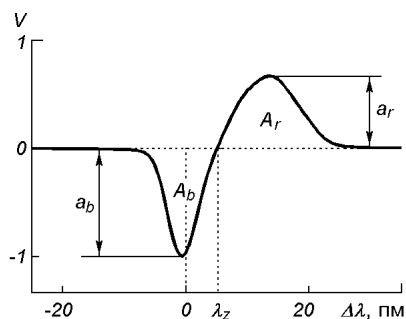


Рис. 1. Обычный нормализованный асимметричный V -профиль спектральной линии Fe I λ 630.2 нм, который был синтезирован внутри сильной магнитной трубки с отрицательной полярностью. Форма профиля описывается амплитудами a_b , a_r и площадями A_b , A_r голубого и красного крыльев, нулевым пересечением λ_z и параметрами асимметрии амплитуд и площадей $\delta a = \frac{|a_b| - |a_r|}{|a_b| + |a_r|}$ и $\delta A = \frac{|A_b| - |A_r|}{|A_b| + |A_r|}$

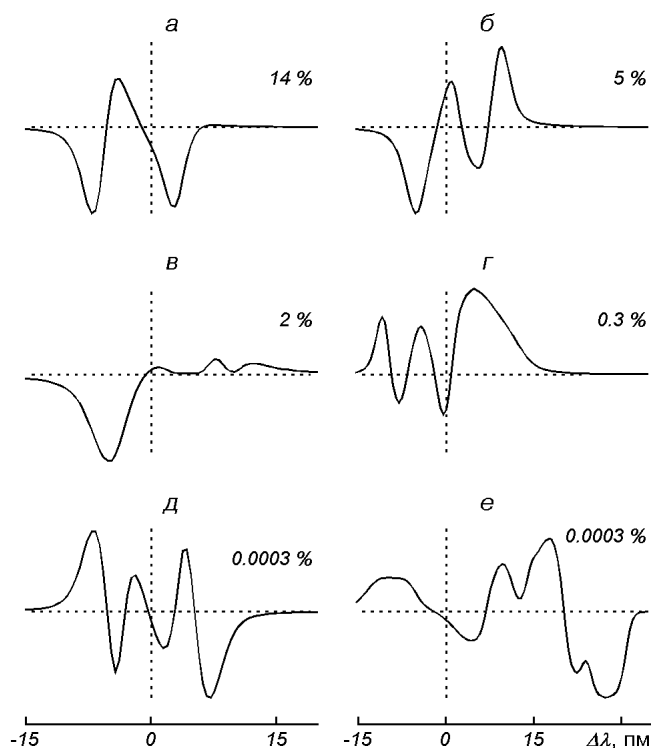


Рис. 2. Типичные формы и относительные доли необычных нормализованных V -профилей спектральной линии Fe I λ 630.2 нм

Согласно данным поляриметрических наблюдений [14, 25, 27, 28, 30] форма V -профилей (далее — профилей) в активных и спокойных областях Солнца довольно разнообразна. Она практически не бывает антисимметричной, как это должно быть для статических атмосфер. В динамических неоднородных атмосферах профили почти всегда асимметричны вследствие градиентов магнитного поля и поля скоростей вдоль луча зрения [31]. В зависимости от сложности обычными называют профили с двумя пиками противоположных знаков (рис. 1), а необычными — с тремя и более или с виртуально одним пиком (рис. 2).

Асимметрия обычных профилей достаточно хорошо исследована [10, 14, 18, 28]. В центре диска вне солнечных пятен большинство обычных профилей проявляют положительную асимметрию амплитуд и площадей, т. е. голубое крыло преобладает над красным; асимметрия амплитуд в среднем больше, чем асимметрия площадей.

Необычные профили впервые были обнаружены в полутени пятен [16]. Их природа была объяснена тонкими пространственно неразрешимыми магнитными структурами с противоположной полярностью и различными потоками вещества в них [32]. Затем необычные профили были найдены в активных областях [21, 24], чаще всего они встречались вдоль нейтральной линии. Их природу объясняли суперпозицией двух и более магнитных компонентов различной полярности в одном пространственно-разрешенном магнитном элементе [8] и сифонными потоками [22]. Кроме простых 2- и 3-компонентных моделей с магнитным полем противоположной полярности, была использована идея микроструктурирования магнитного поля [24, 25]. В рамках этой идеи магнитное поле в факельных площадках рассматривалось как статистический ансамбль очень малых, оптически тонких, почти вертикальных магнитных элементов, вмороженных в немагнитную среду с нисходящими потоками вещества. В результате с помощью инверсионного метода в работах [24, 25] были успешно воспроизведены различного вида необычные профили, наблюдаемые в сеточных и межсеточных полях. Важные результаты были получены посредством моделирования различных ситуаций в поведении атмосферных параметров. В работе [11] были рассмотрены специфичные конфигурации магнитного поля и поля скоростей, разделенные между собой в пространстве, которые приводят к наблюдаемой экстремальной асимметричности профилей. Совместное влияние на форму профилей магнитопаузы и температурной инверсии также может быть причиной сильной асимметрии, как было показано в работе [34].

В работе [28] впервые было обнаружено значительное количество (около 3.5 %) профилей с необычной формой в наблюдениях спокойных областей с пространственным разрешением лучше 1". Анализ этих наблюдений показал [27], что необычные профили группируются в биполярных активных областях вблизи нейтральной линии, где наблюдается усиленная линейная поляризация. Для объяснения сложных форм линий в работах [27, 28] было высказано предположение, что сложные профили образуются вследствие суперпозиции обычных профилей с противоположными полярностями (так называемые профили смешанной полярности). Для объяснения того факта, что профили смешанной полярности были также найдены далеко от нейтральной линии, предполагалось наличие в фотосфере небольших магнитных биполярных петель [17, 33] или сильно наклонных полей [32]. Причиной может быть также турбулентный [7] или грануляционный [13] характер магнитных полей, которые генерируются локальными грануляционными потоками. В таком случае не исключены многократные реверсы полярности магнитных межсеточных полей.

Новые наблюдения [14, 30] подтвердили наличие необычных профилей в спокойных областях. Их доля сильно зависит от пространственного разрешения, спектральной линии и величины магнитного потока. Из этих наблюдений также следует, что уменьшение магнитного потока в наблюдаемой области приводит к увеличению доли необычных профилей.

Итак, для объяснения экстремальной асимметричности V-профилей Стокса предлагалось несколько механизмов. Для их проверки необходим детальный анализ профилей Стокса с очень высоким пространственным разрешением, когда поверхностные структуры фотосферы не будут влиять на профиль.

В настоящее время профили с наибольшим пространственным разрешением можно получить только на основании результатов численного МГД-моделирования магнитоконвекции [26]. Этот подход также дает возможность исследовать причины асимметричности необычных профилей, и к тому же обладает некоторыми преимуществами. Он не требует разработки сценариев

образования необычных профилей. Он предлагает модель атмосферы, физически согласующуюся с решениями МГД-уравнений, и начал уже успешно применяться в физике Солнца. Опыт работ [6, 12, 15, 20, 23, 35] свидетельствует о большом разнообразии синтезируемых необычных профилей и доказал, что МГД-модели весьма полезны для изучения образования профилей Стокса.

Здесь мы продолжаем начатое нами в [20] исследование происхождения необычных профилей на основе синтезированных профилей Стокса, полученных в рамках двухмерных МГД-моделей А. С. Гадуна [9].

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МГД-МОДЕЛЕЙ

Параметры неоднородной атмосферы, необходимые для вычислений профилей, были получены А. С. Гадуном [3] в результате двухмерного МГД-моделирования магнитоконвекции. Размер моделируемой области составлял 3920×1820 км с пространственным шагом 35 км. Атмосферные слои занимали около 700 км. В качестве начальной принималась немагнитная двумерная гидродинамическая модель. Начальное магнитное поле было задано в виде петли с переменной по глубине напряженностью. Среднее пространственно усредненное по всей расчетной области значение напряженности $\langle |B| \rangle$ было равно 5.4 мТл. Для верхних и нижних границ B задавались условия $B_x = 0$, $\frac{\partial B_z}{\partial z} = 0$. Особенность задания начального поля

состояла в том, что магнитное поле и атмосферные параметры начальной ГД-модели не были самосогласованны в начальный момент. Поэтому начальное поле выбиралось таким, чтобы оно как можно лучше соответствовало топологии течений и особенностям условия равнораспределения в моделируемой области.

В начальный период моделирования первоначальное и диффузионное (диффундирующее в модельную область) магнитные поля накапливаются в основании моделируемой области, где по условию равнораспределения его значение должно быть больше. Возможные механизмы накопления магнитного поля — топологическая накачка, связанная с градиентом плотности [2], а также локальное динамо в верхних турбулизованных слоях конвективной зоны [7]. Основное условие для действия механизма динамо — это превышение кинетической энергии над магнитной, чтобы иметь достаточный запас энергии, переходящей в магнитную. В работе [3] на рис. 2 показано отношение магнитной и кинетической энергии в моделируемом боксе для используемых нами МГД-моделей. Из него видно, что в подфотосферных слоях длительное время кинетическая энергия преобладает. По-видимому, там происходит генерация магнитного поля вследствие действия механизма динамо. В то же время в атмосферных слоях этот механизм работает только первые 20 мин. В это время в атмосферных слоях преобладает хаотичное (турбулентное) распределение магнитного поля.

Одновременно в области моделирования действует кинематический механизм — выталкивание (выметание) восходящими конвективными движениями магнитного поля из центральных частей конвективных ячеек и концентрация силовых линий на их границах в местах нисходящих потоков. Этот механизм остается эффективным до тех пор, пока поле не достигнет уровня равнораспределения. Согласно [3] кинематический механизм в фотосфере Солнца может приводить к концентрациям поля 70—100 мТл на уровне излучающего слоя в областях опускающихся потоков.

Затем начинает вступать в действие термический механизм или конвективный коллапс — сконцентрированное кинетическим механизмом поле

препятствует проникновению возвратных течений в образовавшуюся магнитную концентрацию, что приводит к ее переохлаждению и опусканию в более глубокие слои с натяжением магнитных силовых линий. В верхней части этой магнитной конфигурации образуется область пониженного давления, которая служит причиной осцилляций и неустойчивости магнитной конфигурации в целом. Главная особенность этого механизма — зависимость от размера области нисходящего потока. Чем она шире, тем больше возможностей для создания условий развития конвективного коллапса.

В фотосферных слоях концентрации магнитного вертикального поля способствует еще и поверхностный механизм, который начинает действовать во время фрагментации крупномасштабных поднимающихся конвективных ячеек [4, 9]. Горизонтальные поверхностные поля захватываются опускающейся плазмой в центре гранулы и переносятся в более глубокие слои, образуя компактные магнитные структуры (plumes), и затем усиливаются за счет термического эффекта.

В результате действия вышеописанных механизмов в течение 50 мин моделирования магнитное поле достигает значений $\langle |B| \rangle \approx 40$ мТл. После 50 мин моделирования наблюдается воздействие компактных магнитных концентраций (магнитных трубок) на окружающую плазму — это яркие точки и появление осциллирующих восходяще-нисходящих потоков в межгранульных промежутках. Также изменяется характер грануляции. Магнитное поле оказывает стабилизирующее влияние на грануляцию — уменьшаются как размеры гранул, так и горизонтальные сдвиговые смещения гранул. В области моделирования формируются и эволюционируют килогауссовые магнитные трубки. Иногда магнитные трубки с противоположными полярностями аннигилируют, а с одинаковыми полярностями объединяются. Области между магнитными трубками заполнены почти горизонтальными слабыми магнитными полями смешанной полярности. В это время среднее значение напряженности поля по всей моделируемой области изменяется между 40 и 50 мТл.

СИНТЕЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОФИЛЕЙ

Для данного исследования мы избрали часовую последовательность МГД-моделей после 60 мин моделирования. Временной шаг равен 60 с до момента 94 мин и 30 с после. Всего мы использовали 86 временных срезов моделируемой атмосферы. Каждый такой срез имеет 112 лучей, для каждого из них были вычислены профили Стокса линии Fe I λ 630.25 нм путем интегрирования уравнений Унно-Рачковского в приближении ЛТР. Всего было получено 9632 профилей. Эти вычисленные профили подобны наблюдаемым в областях спокойной сетки и между сеткой, расположенных в центре диска Солнца, где есть сильные поля магнитных трубок около 150 мТл и слабые гранульные поля от 70 до 1 мТл на уровне $\tau_5 = 1$. Пространственное разрешение вычисленных профилей равняется пространственному шагу моделирования 35 км, что значительно выше, чем разрешение наблюдаемых профилей.

Для вычислений наилучшим образом подходит линия нейтрального железа λ 630.2 нм. Ее профили Стокса высокочувствительны к градиентам магнитного поля и поля скоростей в фотосфере Солнца от уровня 0.0 до уровня -4.0 в логарифмической шкале оптических глубин. Средняя глубина области формирования линии λ 630.2 нм вдоль каждого луча в неоднородной модели может отличаться от -0.5 до -1.5 в зависимости от вариаций основных параметров модели. В связи с этим трудно говорить о конкретном среднем уровне формирования профилей линии в неоднородной атмосфере.

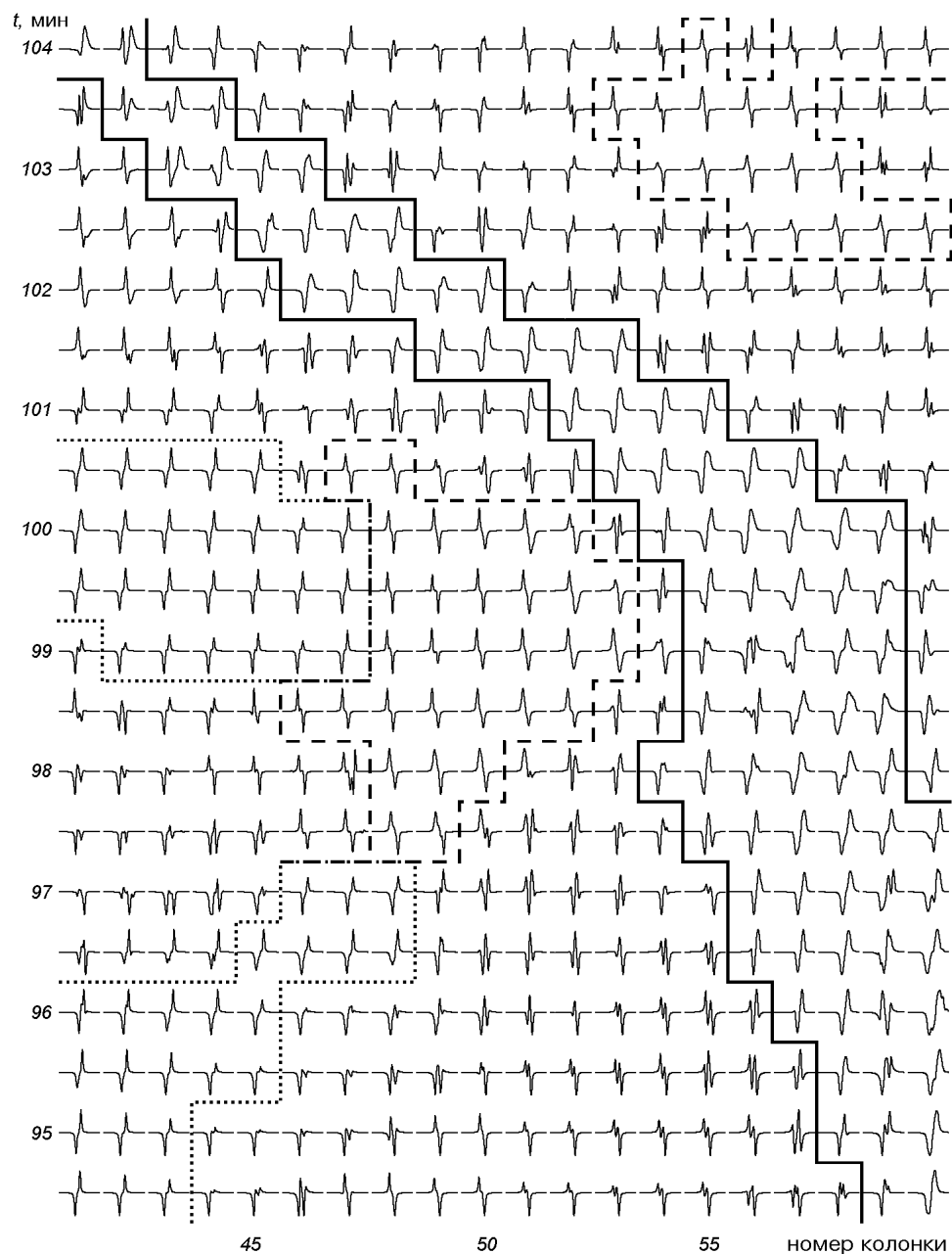


Рис. 3. V -профили Стокса спектральной линии Fe I λ 630.2 нм, вычисленные в каждой колонке небольшого фрагмента моделируемой области, обозначенной квадратом на рис. 4 и 5, и нормализованные к максимальному значению амплитуды. Сплошной линией отмечены профили в расположении сильной магнитной трубки с отрицательной полярностью. Очерчены группы обычных профилей в областях слабого магнитного поля с отрицательной полярностью (пунктир) и с положительной (штриховая)

Также нельзя не отметить, что в линии λ 630.2 нм наиболее часто ведутся наблюдения на солнечных поляриметрах [10, 15, 23–25, 28, 30].

На рис. 3 мы демонстрируем вычисленные V -профили для небольшого фрагмента из области моделирования, отмеченного квадратом на рис. 4 и 5. Здесь можно найти группы обычных и необычных профилей с небольшим зеемановским расщеплением. Профили с большим расщеплением выделены

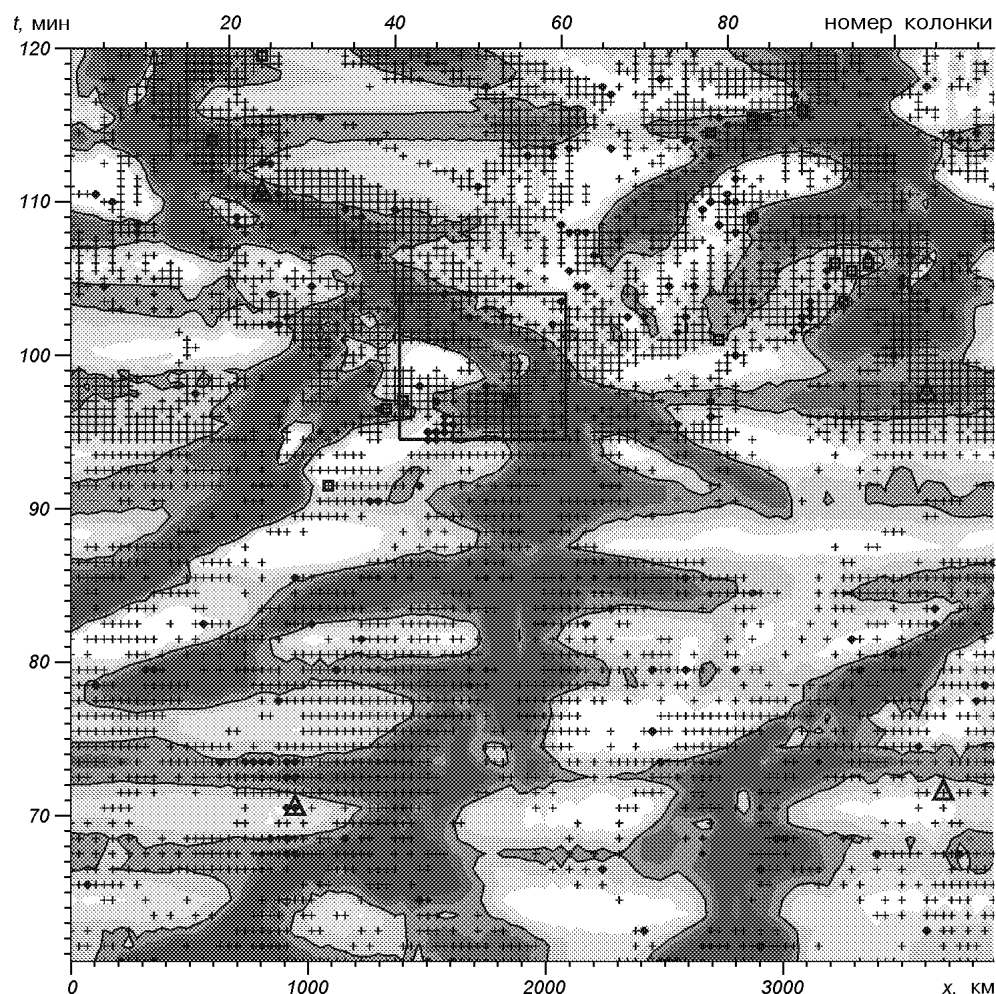


Рис. 4. Распределение поля скоростей в моделируемой области на уровне поверхности $\tau_5 = 1$ в течение $t = 60$ мин. Шесть градаций серого от темных тонов (нисходящие потоки) до светлых (восходящие) соответствуют вертикальным скоростям: более 2, 2...1, 1...0, 0...-1, -1...-2, менее -2 км/с. Сплошная линия — линия нулевых скоростей. Синтезированные V-профили необычных форм отмечены крестиками, однопиковые красные — квадратами, а голубые — ромбами. Профили, для которых выполнен анализ условий формирования, отмечены треугольниками

сплошной линией. Они расположены в области сильного поля, где эволюционирует сильная магнитная трубка. Случаи, когда выполняется равенство амплитуд профилей $|a_b| = |a_r|$ и площадей $A_b = A_r$, довольно редкие в неоднородной атмосфере. Эти равенства, как правило, нарушены, и практически все профили асимметричны. Из рис. 3 видно, что группы обычных с двумя четко выраженными пиками профилей окружают необычные профили с несколькими пиками или с одним. Также можно отметить, что в области периферии магнитных трубок часто располагаются профили с четырьмя и тремя пиками.

Среди синтезированных необычных профилей мы нашли довольно большое разнообразие форм. Мы выполнили классификацию всех вычисленных профилей по числу пиков в профиле, а не по его форме. Если количество пиков в обычных профилях только два, то в необычных мы

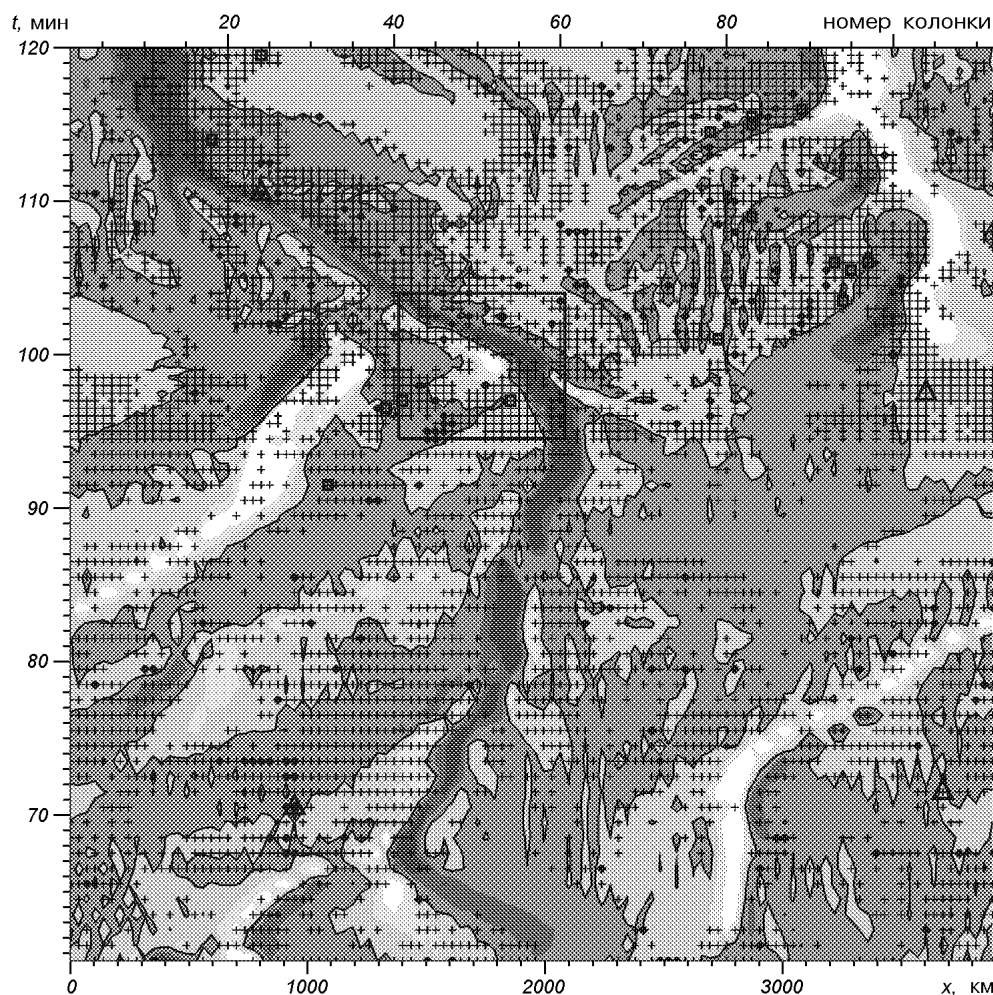


Рис. 5. Распределение напряженности магнитного поля на уровне $\tau_5 = 1$ с указанием положительной (светлые тона) и отрицательной (темные) полярностей. Сплошные линии — нейтральные линии магнитного поля. Показаны градации: более 100, 100...50, 50...0, 0...-50, -50...-100, менее -100 мТл. Синтезированные V -профили необычных форм отмечены так же, как и на рис. 4

нашли от одного до шести. Вероятность P_n появления профилей с числом пиков n зависит от выбранного предельного значения минимальной амплитуды, которое мы определяем согласно отношению $r = |a_{\min}|/|a_{\max}|$ в каждом профиле и задаем это значение при автоматической выборке n -профилей. В табл. 1 мы приводим относительные доли профилей с разным числом пиков при разных предельных значениях минимальной амплитуды пика. Так как в наблюдаемых профилях пики с малыми амплитудами сглажены атмосферными и инструментальными эффектами, мы выбрали для дальнейшего анализа выборку необычных профилей с $r = 25\%$, так как здесь число однопиковых профилей сравнимо с наблюдаемыми значениями. Все профили, в которых обнаружены два пика, мы относим в группу обычных профилей. Не исключено, что в эту группу могут попасть профили с двумя пиками одного знака, однако их количество ничтожно мало.

Согласно табл. 1 доля необычных профилей для выборки с $r = 25\%$ равна 21%, среди них чаще всего встречаются трехпиковые (14%). По

Таблица 1. Относительные доли профилей с различным числом n пиков и предельным отношением $r = |a_{\min}|/|a_{\max}|$. $\langle a \rangle = \sum |a_{\max}|/N_n$ — усредненная максимальная амплитуда в каждой n -группе, P_n — доля n -пиковых профилей от всех вычисленных (9632), P_b — доля «голубых» профилей, P_{ft} — доля профилей, формирующихся вблизи магнитных трубок

n	r = 1 %			r = 15 %			r = 25 %			
	$\langle a \rangle$	$P_n, \%$	$P_b, \%$	$\langle a \rangle$	$P_n, \%$	$P_b, \%$	$\langle a \rangle$	$P_n, \%$	$P_b, \%$	$P_{ft}, \%$
1	0.045	0.01	100	0.055	0.4	100	0.056	2	91	3
2	0.104	52	92	0.094	72	91	0.091	79	90	10
3	0.080	21	81	0.070	18	74	0.068	14	74	13
4	0.054	23	83	0.046	9	78	0.045	5	77	10
5	0.044	3	69	0.038	0.7	59	0.047	0.3	61	19
6	0.040	0.9	67	0.130	0.01	66	0.164	0.03	66	67

форме (рис. 2, а) они часто напоминают U - и Q -профили, но могут быть и другие формы, например, все три пика имеют положительные амплитуды. Профили с четырьмя пиками (рис. 2, б) составляют 5 %. Однопиковые (рис. 2, в) составляют 2 %. Остальные типы профилей с пятью и шестью пиками (рис. 2, г—е) встречаются значительно реже. Заметим, что полярность пиков во всех типах профилей, показанных на рис. 2, может быть иной, а их амплитуды и доплеровские сдвиги — различными. Профили с пиками одной полярности встречаются довольно редко. Однопиковые профили, как правило, имеют один четко выраженный пик в одном крыле, тогда как во втором крыле пик либо не виден, либо относительно мал. Из табл. 1 видно, что среди вычисленных профилей преобладают профили с максимальной амплитудой в голубом крыле.

Средняя максимальная беззнаковая амплитуда профилей $\langle a \rangle$ в группах для $2 \leq n \leq 5$ уменьшается с увеличением числа пиков. Это говорит о том, что аномальные профили, как правило, слабые. Средняя амплитуда в однопиковых профилях несколько выше, чем минимальная по группам, а амплитуда с максимальным числом пиков значительно превышает все остальные только потому, что именно в эти группы, кроме слабых профилей, попадают очень сильные, которые образуются вблизи сильных магнитных трубок. Так, на рис. 2 из двух шестипиковых профилей один очень слабый (д, $a_{\max} = 0.004$), а другой — очень сильный (е, $a_{\max} = 0.4$).

В общем случае все синтезированные нами необычные профили можно разделить на два типа: многопиковые и однопиковые. В то же время в работах [27, 28] наблюдаемые аномальные профили были разделены на три типа: смешанные, динамические и однопиковые. Динамические отличаются от смешанных только значительными доплеровскими сдвигами. В нашем случае динамические и смешанные составляют один тип многопиковых профилей.

В табл. 2 мы сравниваем количество профилей разных типов, полученных нами в результате синтеза, и полученных из наблюдений. Среди всех наблюдаемых профилей для анализа отбирались профили, в которых амплитуда самого сильного пика превышала 0.0015 в [27] и 0.001 в [30]. Вычисленные нами профили имеют значения амплитуд $|a_{\max}| \geq 0.0014$, и поэтому все они были использованы для анализа. Видно, что полученные нами результаты в целом не противоречат наблюдениям.

Согласуются они и с результатами синтеза профилей [15], которые получены с использованием трехмерных МГД-моделей [38] с пространственным разрешением 20 км. Согласно этим результатам количество ано-

Таблица 2. Количество профилей разных типов, полученных в результате наблюдений и синтеза; в скобках — их доля от всех анализируемых профилей

Данные	Все наблюдаемые V-профили	Необычные	п-пиковые	Однопиковые «голубые»	Однопиковые «красные»
Активная обл. [27]	99638	6275 (6.3 %)	5248 (5.3 %)	660 (0.7 %)	367 (0.3 %)
Спокойная обл. [27]	38360	2599 (6.8 %)	1698 (4.4 %)	707 (1.8 %)	193 (0.5 %)
Спокойная обл. [30]	9360	3276 (35 %)	—	—	—
Наш синтез	9632	2050 (21 %)	1863 (19 %)	171 (1.8 %)	16 (0.2 %)

мальных профилей уменьшается с увеличением магнитного потока. Так, с увеличением средней беззнаковой напряженности магнитного поля от 0.1 до 14 мТл количество необычных профилей изменилось от 35 до 23 %, а однопиковых — от 7 до 2 %. В нашем случае среднее значение поля было значительно большим (≈ 50 мТл). В общем можно считать, что наши данные не противоречат ни наблюдениям, ни найденным в [15] значениям относительного числа необычных и однокрылых профилей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Первые наши результаты по изучению природы однопиковых профилей были представлены в работе [20], где использовалась последовательность двумерных МГД-моделей А. С. Гадуна [19]. Она имела бóльшую область моделирования 5000×1600 км, меньший пространственный шаг 25 км, меньшую начальную среднюю напряженность биполярного магнитного поля 3.2 мТл и в общем меньшую максимальную напряженность развитых магнитных трубок. Количество необычных профилей составило 45.5 % и однопиковых 3.6 % от всех синтезированных профилей. Оказалось, что большинство профилей с одним пиком встречаются в областях со слабым горизонтальным магнитным полем, в котором происходит смена полярности вдоль луча зрения. Меньшая часть таких профилей возникает вблизи, но не внутри зон сильных магнитных концентраций, где градиенты скорости и магнитного поля вдоль луча зрения очень сильные. Здесь мы будем рассматривать не только однопиковые, но и многопиковые профили, чтобы объяснить природу асимметричности профилей в целом.

Пространственное распределение необычных профилей на грануляционной поверхности. Рис. 4 показывает пространственно-временное распределение необычных профилей на фоне изображения вертикальной составляющей поля скоростей на уровне $\tau_5 = 1$. Данные о поле скоростей были взяты непосредственно из результатов двумерного МГД-моделирования. На тонированном рисунке отчетливо видно, как нулевая линия скоростей разделяет области восходящих потоков (светло-серые тона) от областей нисходящих потоков (темно-серые). Полученное изображение поля скоростей условно можно сравнить с изображениями наблюдаемых доплерограмм, с помощью которых также можно демонстрировать грануляционную картину поверхности фотосферы. Мы не приводим здесь традиционную картину грануляции в виде распределение интенсивности, так как нас больше интересует поле скоростей, непосредственно влияющее на асимметрию профилей. На рис. 4 можно выделить гранулы и межгрануляционные промежутки в нашем смоделированном пространственно-временном изображении фотосферы и сопоставить с ними распределение необычных синтезированных профилей. Как видно, необычные профили располагаются на грануляционной поверхности большими группами в основном в пограничных местах гранул и

межгрануляционных промежутков. Иногда они встречаются также и в центрах гранул. Среди необычных профилей однопиковые (темные ромбики — «голубые», квадратики — «красные» профили) не создают больших групп. Они встречаются между обычными и необычными профилями или среди необычных, и располагаются на границах гранул и межгранульных промежутков и между ними вблизи нулевых линий вертикальных скоростей, т. е. в местах, где восходящие грануляционные потоки сменяются межгрануляционными нисходящими потоками вещества.

Подобно распределению скоростей мы также построили на рис. 5 распределение напряженности магнитного поля с указанием положительной (светло-серый цвет) и отрицательной (темно-серый) полярностей поля, разделенных нейтральными линиями. Распределение по поверхности областей с различной полярностью чрезвычайно неоднородно. Относительно большие участки поверхности с одной полярностью магнитного поля встречаются в грануляционных областях вдали от сильных магнитных трубок и усиленных нисходящих движений. Наибольшую протяженную область магнитного поля с положительной полярностью и напряжением ниже 100 мТл можно увидеть на рис. 5 ($x_1 = 2200$ км, $x_2 = 3500$ км, $t_1 = 85$ мин, $t_2 = 100$ мин). Очень много в области моделирования полей со смешанными полярностями. Так, большой участок с такими полями виден начиная с $t = 100$ мин. Около $t = 104$ мин и $x = 1300$ км произошло сближение двух трубок и их разрушение. Эти трубки видны на рис. 5 как места с наиболее интенсивной плотностью. И далее с этого момента структура поля почти по всей области моделирования сильно усложнилась. Появилось много небольших областей с противоположными полярностями и нейтральными линиями.

Теперь рассмотрим расположение необычных профилей относительно поверхностной структуры магнитного поля. Отчетливо видно, что они появляются как вблизи, так и вдали от нейтральных линий. Однопиковые профили почти всегда встречаются вдоль нейтральной линии, где происходит смена полярности магнитного поля. Необычные профили предпочитают группироваться в областях несильных смешанных магнитных полей меньше 70 мТл, а также вблизи сильных трубок. Доля необычных профилей, расположенных вблизи трубок, составляет 12 % от всех необычных профилей. При отборе этих профилей считалось, что профиль находится вблизи трубки, если напряженность $B_z(\tau_5 = 1)$ поля в колонке, где формируется необычный профиль, превышает 70 мТл. Из табл. 1 видно, что вероятность P_{Π} появления необычных профилей вблизи сильных трубок тем больше, чем больше пиков в профиле.

Кроме этого, мы обнаружили, что в областях с сильными нисходящими потоками вещества, где происходит фрагментация большой гранулы и начинает формироваться магнитная трубка, обязательно находятся большие группы необычных профилей. Пример такой области можно увидеть на рис. 4, 5 с координатами $x_1 = 3200$ км, $x_2 = 3900$ км, $t_1 = 95$ мин, $t_2 = 99$ мин. В последующее время в этой области уже видна килогауссова трубка положительной полярности.

Мы также выполнили количественное исследование зависимости появления необычных профилей в областях с различным магнитным потоком. Из рис. 6, а и в следует, что есть тенденция уменьшения количества необычных профилей с увеличением средней беззнаковой напряженности магнитного поля в области. Этот факт подтверждает закономерность, найденную ранее в работе [15]. В то же время имеется тенденция уменьшения числа необычных профилей, когда плотность потока $\langle B_z \rangle$ отличается от нуля (рис. 6, б), и когда в области в среднем начинает преобладать магнитное поле с той или иной полярностью. Можно сказать,

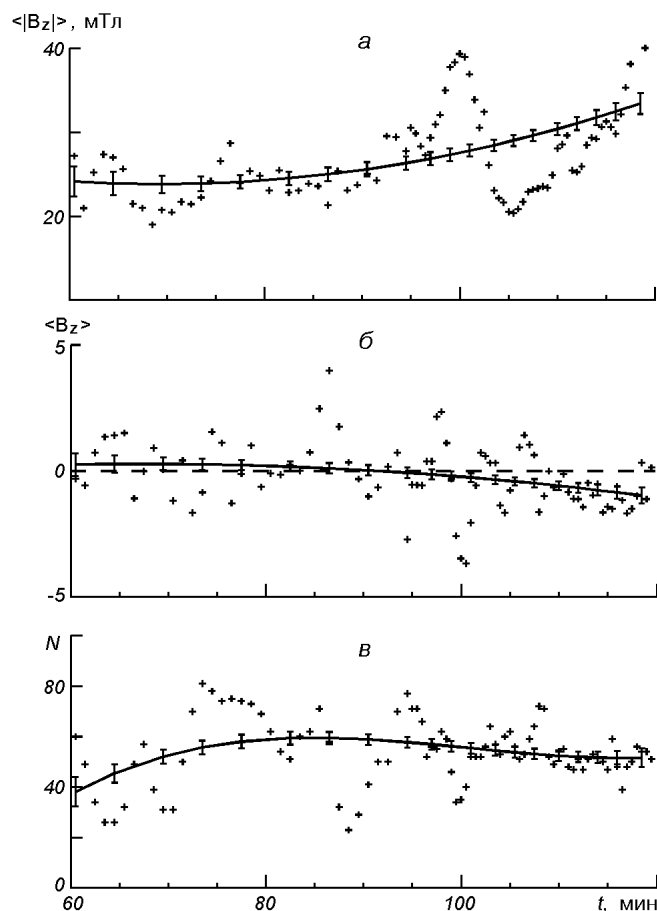


Рис. 6. Изменение со временем в области моделирования: *а* — средней беззнаковой напряженности $\langle |B_z| \rangle$ магнитного поля на уровне $\tau_5 = 1$, *б* — плотности $\langle B_z \rangle$ магнитного потока на этом же уровне, *в* — количества N необычных профилей

что эта зависимость отражает степень смешанности полей различной полярностей в «магнитной» области. Чем ближе величина $\langle B_z \rangle$ к нулю, тем сильнее перемеживаются магнитные поля разной полярности в данной области. Это легко проследить, сопоставляя рис. 5 и 6.

Итак, из сопоставления распределения необычных профилей с распределениями по поверхности скорости, напряженности магнитного поля и полярности становится понятным, что важным условием для появления необычных профилей является наличие смешанных магнитных полей и нейтральных линий. Однопиковые профили по сравнению с многопиковыми профилями предпочитают места вблизи нейтральной линии, и часто вблизи нулевой линии. Тот факт, что однопиковые профили часто встречаются на самых краях гранул и межгранул и значительно реже — в их центральных областях, говорит о том, что они появляются в наиболее экстремальных условиях при переходе от одних структур к другим. Природа асимметричности однопиковых и многопиковых профилей, по-видимому, не должна отличаться. Для выяснения этого мы рассмотрим более детально с помощью функций вклада формирование этих профилей и влияние на их форму градиентов магнитного поля и поля скоростей вдоль луча зрения.

Однопиковые профили. Как и следовало ожидать согласно данным наблюдений [27], среди синтезированных однопиковых профилей мы обнаружили без учета знака полярности два типа однопиковых профилей: 58 % «голубых» и 42 % «красных» (см. пример «голубого» профиля на рис. 2, в). Мы также разделили однопиковые профили на гранульные, межгранульные и краевые в соответствии с рис. 4. В табл. 3 представлены количественные данные распределения необычных профилей на поверхности согласно нашим подсчетам. Видно, что чаще всего однопиковые профили встречаются в гранульных областях, и среди них подавляющее большинство (84 %) оказываются «голубыми», тогда как в межгранулах и на их границах чаще встречаются «красные» профили (60 %). Такая статистика свидетельствует о значительном влиянии поля грануляционных скоростей и их градиентов на формирование однопиковых профилей.

Таблица 3. Распределение однопиковых профилей на грануляционной поверхности

Тип	общее число	гранульные	межгранульные	краевые
Однопиковые	187	82 (43 %)	61 (33 %)	44 (24 %)
Голубые	109	69 (63 %)	23 (21 %)	17 (16 %)
Красные	78	13 (17 %)	38 (49 %)	27 (34 %)

Рассмотрим более детально образование «голубых» профилей с помощью вычисленных депрессионных функций вклада вдоль луча зрения. На рис. 7 показаны обстоятельства образования одного из гранульных «голубых» профилей, выделенного треугольником на рис. 4, 5 с координатами $t = 70.5$ мин, $x = 980$ км, номер колонки 28. Верхняя панель демонстрирует вертикальный разрез фрагмента из области моделирования, где жирной линией указан луч, вдоль которого происходит формирование данного профиля. Из представленного здесь распределения модуля напряженности (рис. 7, а) и полярности магнитного поля (рис. 7, б), а также распределения поля скоростей (рис. 7, в) видно, что этот конкретный луч расположен на расстоянии 500 км от центра магнитной трубки. Он пересекает почти горизонтальное магнитное поле в глубоких слоях отрицательной полярности, а в высоких слоях — положительной. Наклон поля в высоких слоях увеличивается вследствие эффекта магнитного покрывала (сапору). Вертикальная скорость восходящего потока уменьшается с высотой от 2 км/с до нуля на границе магнитного покрывала. Соответствующие лучу вертикальные профили температуры T , скорости V_r , напряженности B магнитного поля и его направления γ показаны ниже на фрагменте г.

В последних двух колонках (д) показаны профили депрессионных функций вклада $CP(\lambda)$ на указанных конкретных уровнях геометрической высоты H , и V -профили, полученные в результате интегрирования CP по высотам, лежащим выше данного уровня, т. е. $V/I_c(\tau, \lambda) = \int_{\tau}^0 d\tau_0 CP(\tau_0)$ (более подробно о вычислениях функций вклада $CP(\lambda)$ см. в работе [5]). В последней колонке в самом низу можно увидеть однокрылый V -профиль поглощения выходящего на поверхность поляризованного по кругу излучения.

Сличение профилей показывает, что эффективное образование профиля спектральной линии $\lambda 630.2$ нм происходит в температурной области около

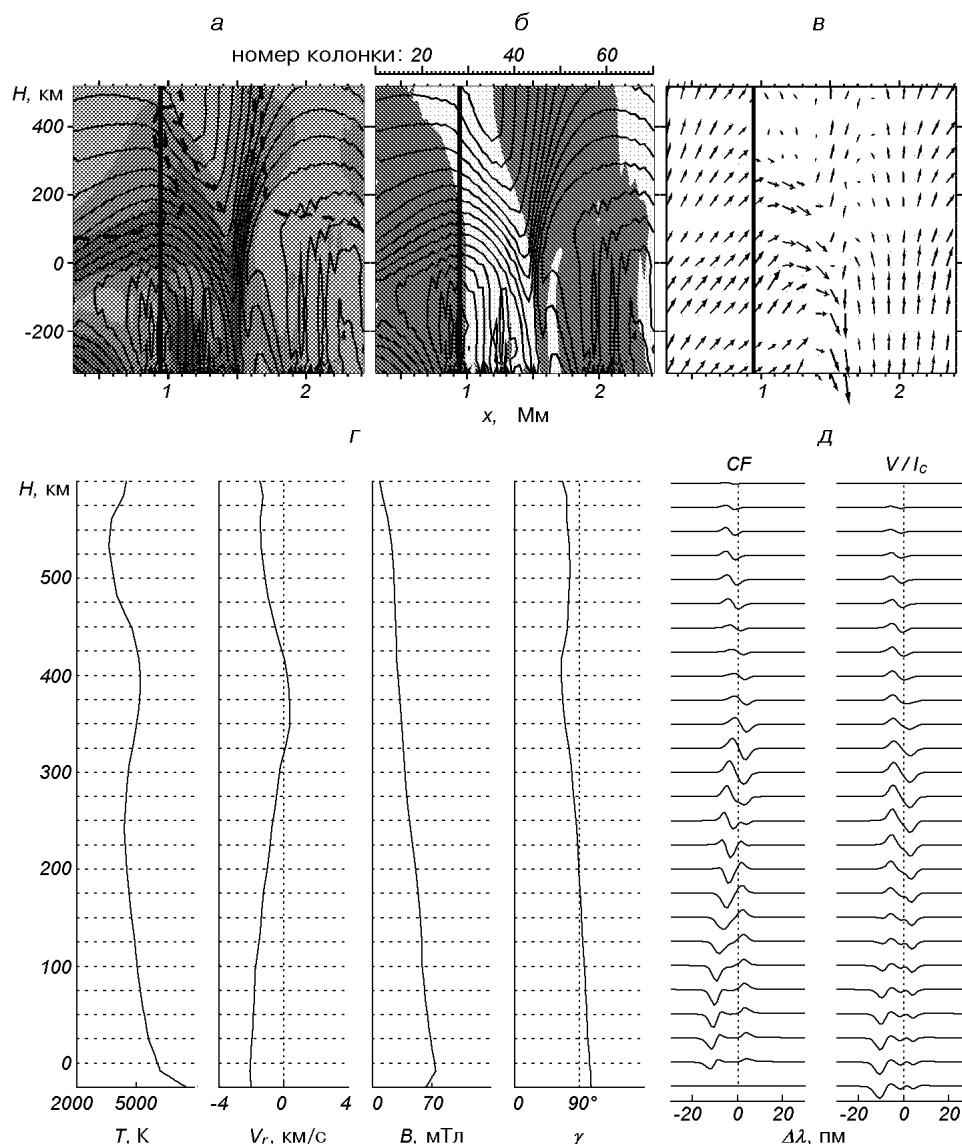


Рис. 7. Образование гранульного V -профиля с голубым крылом: a — вертикальный срез модуля напряженности магнитного поля для фрагмента моделируемой области (четыре градации от темного к светлому цвету соответствуют значениям: более 70, 70—50, 50—25, 25—0 мТл), $б$ — полярности (белая — положительная, серая — отрицательная); $в$ — поля скоростей. Тонкие линии — силовые линии магнитного поля. Жирная линия — луч зрения, вдоль которого вычислялся данный профиль. Жирная штриховая — уровень, где $T = 5000$ К. На фрагменте $г$ — вертикальные профили температуры T , скорости V_r , напряженности B и угла γ наклона магнитного поля; $д$ — профили депрессионных функций вклада CF и выходящая относительная интенсивность профиля V/I_c на разных уровнях атмосферы

5000 К. Чтобы продемонстрировать расположение этой эффективной области в неоднородной атмосфере, мы штриховой линией на рис. 7, a указали уровень $T = 5000$ К на фоне распределения напряженности магнитного поля. Депрессионные вклады в профиль выходящего поляризованного излучения в каждом луче будут наиболее сильны вблизи этого температурного слоя. Здесь следует также обратить внимание на характерное повышение температуры возле магнитной трубки. Это так называемые «горячие стенки»,

которые всегда создаются в верхних слоях трубки вследствие процессов магнитоконвекции [3, 9].

Из вертикального профиля скорости V_r в данном луче (рис. 7, з) и поведения скоростей в близлежащем от этого луча пространстве (рис. 7, в) легко видеть поток, направленный к магнитной трубке, который способствует концентрации поля в трубке. Рассматриваемый нами профиль формируется в области, где отрицательный градиент скорости в глубоких слоях переходит в положительный в высоких слоях. Это приводит к различным по величине голубым доплеровским сдвигам профилей функций вклада на разных уровнях фотосферы, в результате чего интегральный профиль сильно сдвигается в голубую часть спектра. Таким образом, резкое уменьшение скорости с высотой привело к образованию более мощного голубого крыла.

Уменьшение напряженности магнитного поля с высотой (рис. 7, з) колонка) приводит к уменьшению магнитного расщепления и к уменьшению расстояния между пиками профилей вклада с высотой, а перемена направления магнитного поля вдоль луча зрения трансформирует форму функции вклада на обратную. В результате таких сложных комбинаций функций вклада интенсивности компенсируются в красном крыле профиля. Причина перемены полярности вдоль луча зрения видна из рис. 7, б. Это перегиб магнитных силовых линий, расположенных в области восходящего конвективного потока, несущего горизонтальное магнитное поле.

Итак, в результате перечисленных выше процессов при интегрировании по всем слоям вклада с разными знаками компенсируются в красном крыле, а в голубом — накапливаются. Результирующий профиль получается с одним голубым крылом. Основной вклад в формирования профиля происходит в нижних фотосферных слоях, где магнитное поле имеет положительную полярность. В результате интегральный профиль получается с голубым крылом отрицательной амплитуды. Перемена полярности и отрицательный градиент напряженности в области образования профиля привели к подавлению красного крыла, а отрицательный градиент вертикальной скорости привел к усилению голубого крыла. Анализ формирования большого количества «голубых» однокрылых профилей показал, что типичным для них является отрицательный градиент скорости вдоль луча зрения и перемена полярности, а градиент напряженности может быть и отрицательным, и положительным. Также может встречаться перемена знака градиента напряженности вдоль луча зрения. Поэтому гранульные «голубые» профили как правило, несут информацию о том, что в этом месте происходит смена полярности поля, есть значительные отрицательные градиенты вертикальной скорости восходящих движений и также возможны различные градиенты напряженности слабого магнитного поля. Знак амплитуды крыла указывает на полярность магнитного поля в наиболее эффективном слое образования данного профиля.

Что касается гранульных «красных» профилей, то условия их формирования отличаются только тем, что градиент скорости восходящих движений чаще бывает положительным, т. е. с увеличением высоты амплитуда скорости увеличивается.

В межгрануляционных областях со слабым магнитным полем «красные» профили формируются тогда, когда скорости нисходящих потоков в области эффективного формирования превышают 2 км/с. Для меньших скоростей вероятность образования только голубого крыла значительно выше, чем красного. Если в межгранулах находятся сильные магнитные трубки, то на их периферии чаще возникают «красные» профили, чем «голубые». На рис. 8 рассмотрено формирование межгранульного «красного» профиля, расположенного на краю сильной магнитной трубки ($x = 840$ км,

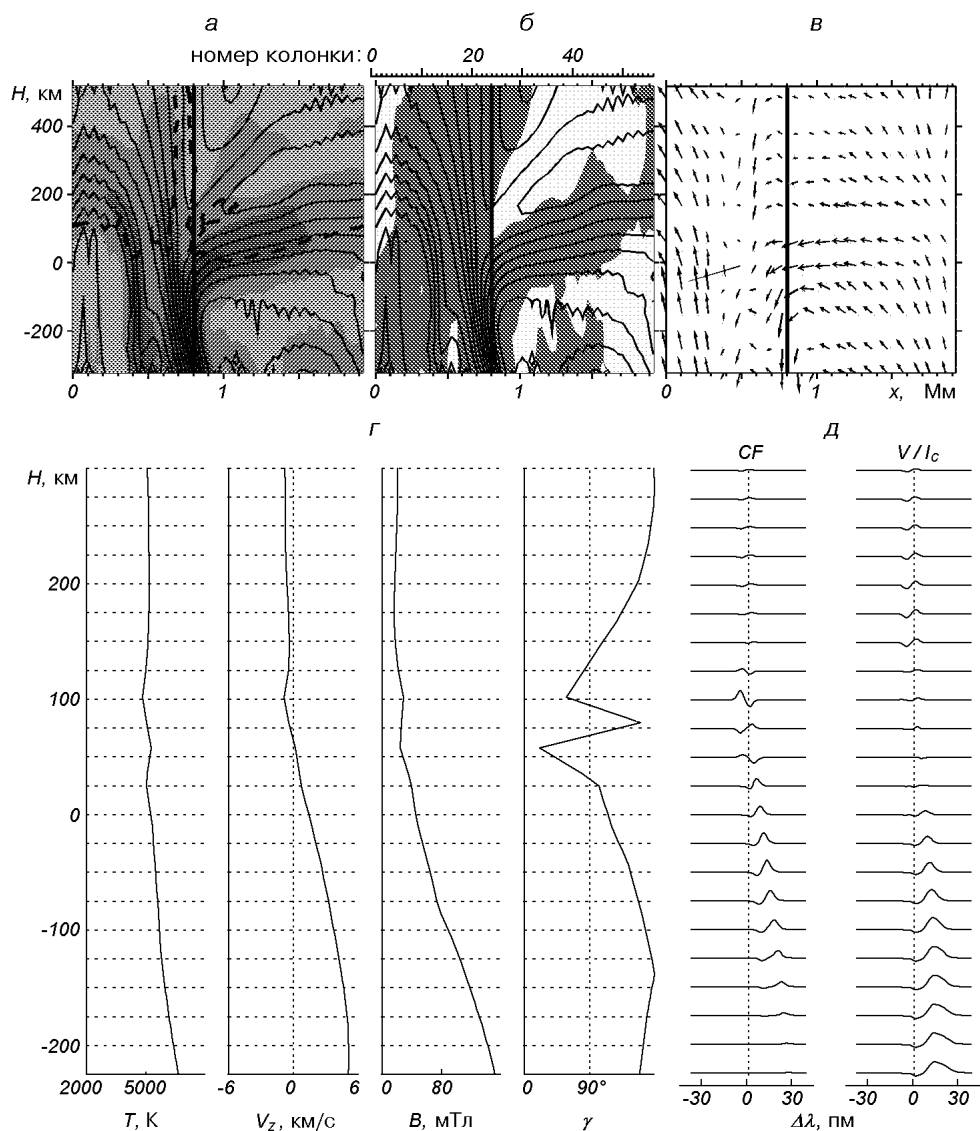


Рис. 8. Образование межгранульного V-профиля с красным крылом вблизи сильной магнитной трубки (пояснения см. рис. 7)

$t = 110.5$ мин, номер колонки 24 на рис. 4, 5). В области эффективного формирования профиля хорошо видны резкие отрицательные градиенты скорости нисходящего потока и напряженности магнитного поля. Также имеется небольшая область, где происходит перемена полярности. В результате получается достаточно широкое красное крыло и подавленное голубое.

Однокрылые краевые профили, и «красные», и «голубые», расположенные на нулевой и нейтральной линии между гранулами и межгранулами, формируются в областях, где скорости близки к нулю и их градиенты незначительные. Поэтому здесь основную роль играют градиенты напряженности и направления магнитного поля.

Выполненный нами анализ условий образования однокрылых профилей показал, что экстремальная асимметрия этих профилей происходит при

двух основных условиях. Первое (необходимое) условие — изменения полярности магнитного поля вдоль луча зрения. Второе (достаточное) условие — наличие градиентов скорости или напряженности магнитного поля. Таким образом, появление однокрылых профилей точно указывает на наличие в фотосфере неоднородных магнитных полей с различной полярностью. Но использовать их форму для диагностики физических условий в магнитных структурах не так просто, ибо причин для ее изменения несколько. Прежде всего на форму профилей влияет горизонтальная неоднородность структурирования поверхности. Этот вопрос детально рассмотрен в работе [15]. Мы изучили причины асимметричности профилей без пространственного усреднения и нашли, что в неоднородных моделях вдоль луча зрения также возможны структурные неоднородности, которые сильно влияют на форму профилей Стокса. Мы также обнаружили, что вид однокрылых профилей зависит от расположения профилей на грануляционной поверхности фотосферы. Поэтому можно констатировать, что преобладание в наблюдаемой области «голубых» однокрылых профилей свидетельствует о преобладании слабых грануляционных магнитных полей, близких к горизонтальным. Доминирование «красных» профилей может свидетельствовать о наличии в области смешанных сильных и слабых магнитных полей и значительных градиентов как напряженности, так и скорости.

Многопиковые профили. Мы проанализировали большое количество многопиковых профилей и условия их образования с помощью функций вклада. Выяснилось, что во всех случаях вдоль луча зрения происходит перемена полярности один или несколько раз. Где бы эти профили ни располагались — вблизи нейтральной линии, вдали от нее в грануле или в межгрануле либо на периферии магнитной трубки — вдоль луча зрения обязательно наблюдается перемена полярности. Также обязательно фиксируются градиенты скорости и напряженности. Причем в случае многопиковых профилей перемена знака градиента скорости и напряженности происходит очень часто. Чем больше пиков в профиле, тем сложнее профиль градиентов.

На рис. 9 мы приводим пример формирования часто встречающегося в наблюдениях типичного профиля с тремя пиками. Здесь луч, вдоль которого вычислен профиль, расположен далеко от магнитной трубки в области восходящего потока ($x = 3710$ км, $t = 71.5$ мин, номер колонки 106 на рис. 4, 5). Мы специально выбрали такой пример, чтобы градиент скорости был подобен рассмотренному ранее в однокрылом «голубом» профиле на рис. 7. Но градиент магнитного поля в этих двух профилях различный. Здесь в области формирования напряженность поля уменьшается с высотой, а затем увеличивается. Именно эта перемена знака градиента и приводит к появлению трехпикового профиля.

В наблюдениях часто встречаются четырехпиковые профили. На рис. 10 показан пример формирования такого профиля ($x = 3640$ км, $t = 97.5$ мин, номер колонки 104 рис. 4, 5) в области устойчивого нисходящего потока вещества. На рис. 10, а—в видно, что в этой области начинают развиваться процессы фрагментации большой гранулы и формирования магнитной трубки. Эти процессы детально описаны в работе [4]. Представленные на рис. 10, г—д вертикальные профили атмосферных параметров вдоль луча показывают, что на форму профиля преимущественно действуют два фактора, которые приводят к образованию четырех пиков. Первый фактор — сконцентрированное в глубоких слоях фотосферы сильное горизонтальное магнитное поле с напряженностью около 100 мТл, которое с высотой резко ослабевает и затем почти не изменяется. Эта ситуация подобна

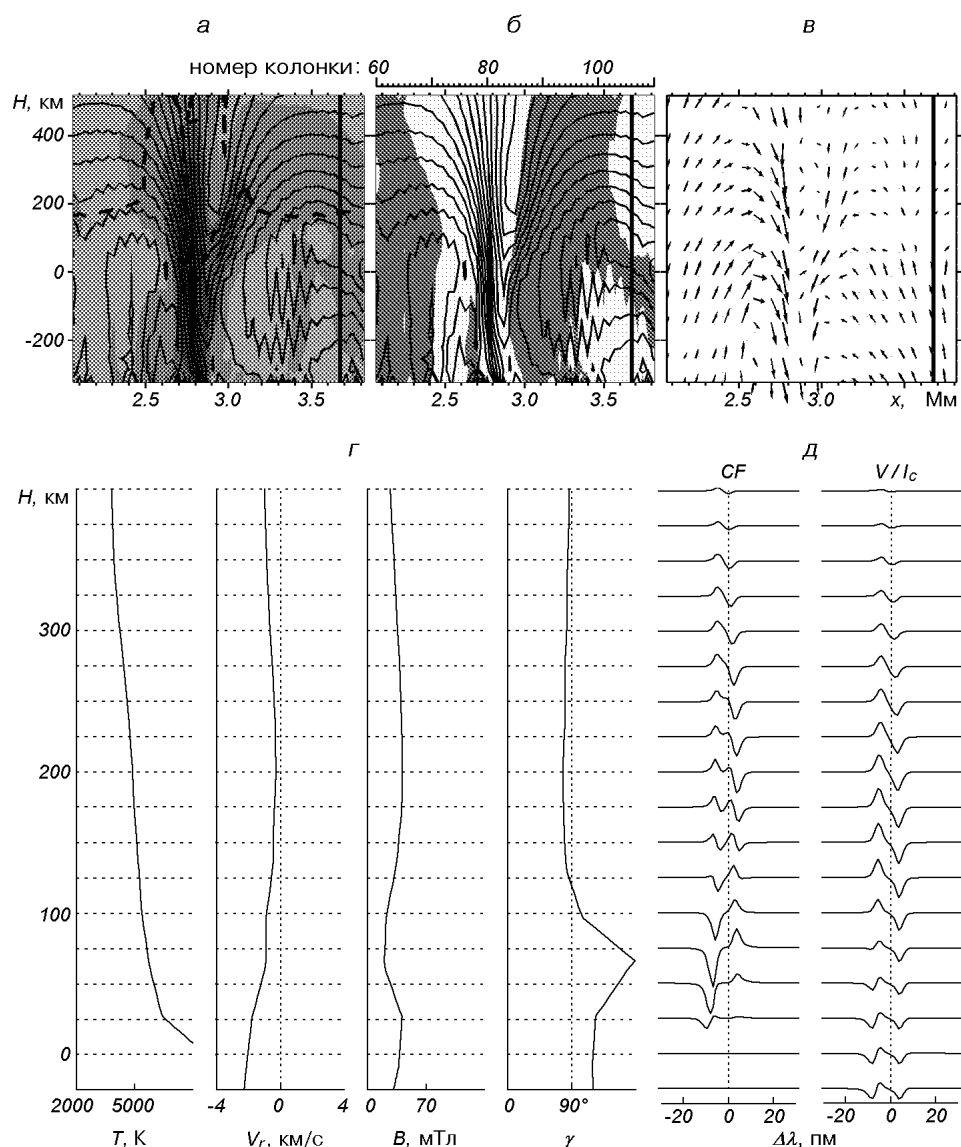


Рис. 9. Образование типичного необычного V-профиля с тремя пиками (пояснения см. рис. 7)

магнитопаузе. Второй фактор — изменение полярности магнитного поля, увлекаемого сильным потоком плазмы в глубокие слои. Вертикальная скорость нисходящего потока вещества имеет слабый градиент и мало влияет на форму профиля.

Количество пиков зависит от конкретного сочетания в данной области формирования всех факторов асимметрии. Можно отметить, для многопиковых профилей характерным является более сложная структура поля скоростей и магнитного поля, более частое изменение знаков градиентов. Для этих профилей трудно найти подобное сочетание градиентов и значений всех трех параметров (скорости, напряженности и угла наклона). Тем не менее, по сравнению с однопиковыми профилями мы не видим существенной разницы в механизмах образования более сложных форм многопиковых профилей.

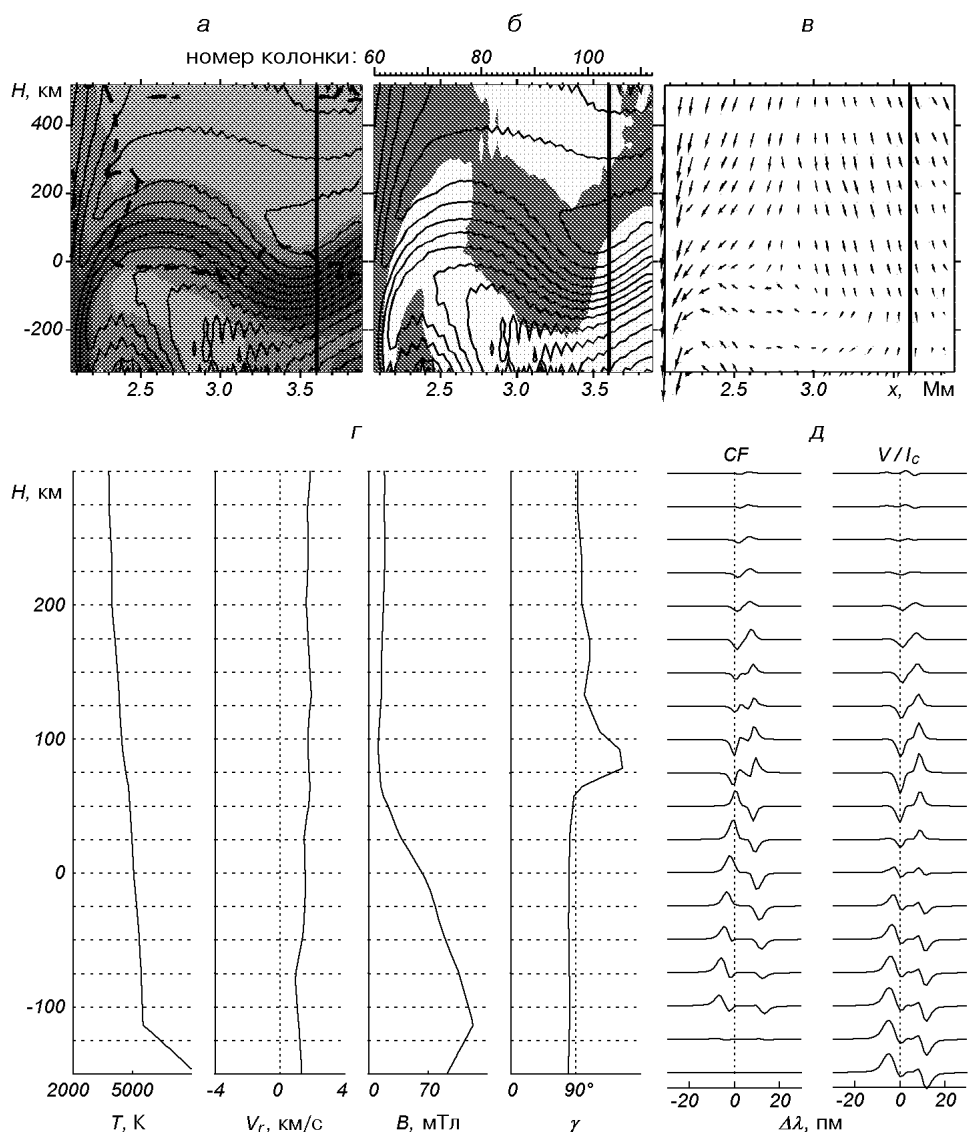


Рис. 10. Образование типичного необычного V-профиля с четырьмя пиками (пояснения см. рис. 7)

Естественно, что в образовании каждого необычного профиля имеются свои особенности, которые отражаются на форме профиля. Но есть и общие черты, которые можно назвать закономерностями образования всех необычных профилей. Это — наличие в области формирования профиля перемен полярности и знака градиентов скорости и напряженности. В результате совместного анализа физических процессов, происходящих в области моделирования, которые видны на вертикальных срезах МГД-моделей, и функций вклада, мы пришли к выводу, что основной причиной экстремальной асимметричности есть рост структурирования магнитного поля. Чаще это происходит недалеко от сильных нисходящих потоков вещества, где происходит формирования магнитных трубок, или рядом с уже развитыми сильными трубками.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании неоднородных моделей фотосферы, полученных в результате численного двухмерного моделирования солнечной магнитогрануляции [3], мы синтезировали 9632 V-профиля Стокса линии Fe I λ 630.2 нм. Максимальное значение амплитуды крыла самого слабого вычисленного профиля $|a_{\max}| = 0.0014$. Число экстремально асимметричных профилей с числом пиков меньше и больше двух зависит от выбранного предельного значения амплитуды минимального пика. Для вычисленных профилей это значение можно считать равным 1 %. Для сравнения наших результатов с наблюдениями мы выбрали предельное отношение амплитуд 25 %. В этом случае доля вычисленных однокрылых профилей соответствовала наблюдениям [27]. Количество аномальных профилей среди всех вычисленных в соответствии предельным отношением амплитуд 1 % и 25 % составило 48 % и 21 %. По результатам недавних наблюдений [30] и результатам синтеза с трехмерными МГД-моделями [15, 23] число аномальных профилей составляет около 35 % для выборки профилей с $|a_{\max}| > 0.001$ или > 0.0015 . Трудно сравнить наши результаты с наблюдениями, так как в наблюдениях найденное число аномальных профилей относится не ко всем наблюдаемым профилям. Тем не менее, вполне возможно, что результаты будут отличаться. Наиболее вероятной причиной различия может быть значения магнитного потока в области. Мы не исключаем также, что причиной может быть двухмерное приближение используемых МГД-моделей. Из-за вынужденного ограничения в двумерном пространстве грануляционные движения вещества могут отличаться от реальных, что неизбежно отразится на структуре магнитных полей и на форме профилей.

Синтезированные нами экстремально асимметричные V-профили продемонстрировали некоторые свойства, обнаруженные ранее в поляриметрических наблюдениях спокойных областей Солнца с пространственным разрешением меньше одной секунды дуги [14, 27, 30]. Например, мы также нашли, что необычные профили часто располагаются группами вблизи нейтральных линий и по краям областей с магнитными трубками, избегая центральных их частей. Форма и сдвиги этих необычных профилей могут быть различные. Наиболее часто встречаются формы профилей с тремя и четырьмя пиками.

Наш анализ с помощью депрессионных функций вклада подтвердил выводы, сделанные в работах [15, 20, 23] о том, что образование однопиковых V-профилей Стокса в областях спокойного Солнца происходит благодаря совместному действию градиентов поля скоростей и магнитных полей со смешанными полярностями. При этом изменение полярностей происходит не только на поверхности, но и вдоль луча зрения. Последнее, на наш взгляд, является очень важным обстоятельством, так как его нельзя обнаружить с помощью прямых наблюдений. В то же время оно указывает на сложную структуру магнитного поля, обусловленную грануляционными движениями.

Наш анализ многопиковых синтезированных профилей позволил сделать новые важные выводы.

1. Необычные профили появляются преимущественно вблизи сильных нисходящих потоков плазмы (2 км/с и больше) на краях гранул и межгранульных промежутков.

2. Большие группы необычных профилей, наблюдаемые в областях со слабыми полями и сильными нисходящими движениями, могут быть предвестниками появления в этих областях сильных магнитных концентраций в виде магнитных трубок.

3. Однокрылые профили с хорошо развитым голубым крылом появляются в основном в гранулах, тогда как в межгранульных промежутках и у нулевой линии преобладают профили только с красным крылом.

4. Природа всех экстремально асимметричных профилей, независимо от количества пиков и их формы, является одной и той же. Главной и необходимой причиной появления профилей с необычной формой является перемена полярности магнитного поля вдоль луча (одна или несколько). Градиенты скорости движения вещества, напряженности и угла наклона магнитного поля, которые являются основной причиной обычной классической асимметрии, также остаются важными факторами формирования необычных профилей. Причем чем больше пиков в профиле, тем чаще происходит перемена знака градиента напряженности магнитного поля вдоль луча. Разное сочетание всех этих факторов, а также разные величины основных атмосферных параметров в области формирования профилей порождает разнообразие их форм.

Мы также хотим подчеркнуть, что полученные нами результаты являются ответами на ряд поставленных в работе [27] конкретных вопросов, касающихся происхождения необычных профилей. Ниже мы приводим их вместе с ответами.

Существуют ли наиболее часто встречаемые типы необычных профилей? Мы обнаружили два таких типа. Это профили с тремя и четырьмя пиками, знаки которых изменяются поочередно.

Какие физические процессы соответствуют наиболее часто встречаемым типам необычных профилей? Это, как правило, сложная структура магнитного поля с переменной знака градиента напряженности и наклона магнитного поля, которая создается вследствие турбулентно-конвективных движений плазмы, и в частности, вследствие процессов формирования магнитных концентраций во время фрагментации больших гранул.

Являются ли однокрылые профили крайним случаем необычных профилей? Вполне возможно, если считать с точки зрения формы профилей. Если же рассматривать с точки зрения происхождения аномальных профилей, то скорее крайним случаем асимметричности следует считать профили с количеством пиков больше четыре.

Являются ли профили необычной формы результатом смешанных полярностей на очень малых масштабах? Да, именно перемена полярности вдоль луча зрения является основной причиной экстремальной асимметричности профилей.

Почему эти необычные профили никогда не встречаются внутри сильных килогауссовых полей? Сильные магнитные трубки с напряженностью больше 100 мТл почти всегда вертикальные в области формирования профиля, и естественно, что перемены полярности здесь не бывает.

Можно ли по форме профилей выполнять предварительную диагностику наблюдаемых участков солнечной поверхности? Появление необычных профилей указывает на сложную структуру магнитного поля как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях, но не указывает на силу магнитного поля. Чаще магнитные поля могут быть слабыми, близкими к горизонтальным в областях восходящего магнитного потока. Реже магнитные поля могут быть наклонными в областях магнитного покрывала недалеко от магнитных трубок, а также почти вертикальными вблизи килогауссовых магнитных трубок.

Что является причиной смешанных полярностей? Какие физические процессы приводят к перемешиванию полярностей на очень малых масштабах? Этот вопрос является основным и мы обсудим его ниже более подробно.

Мы не сомневаемся в том, что экстремальная асимметричность V -профилей с одним и несколькими пиками обусловлена тонкой структурой магнитного поля, создаваемого турбулентными движениями плазмы в области проникающей конвекции в фотосферу Солнца (процессами магнитогрануляции). На сложную структуру поверхностной грануляции обращается внимание в работе по трехмерному гидродинамическому моделированию [36]. Авторы этой работы подчеркивают ведущую роль в процессах солнечной конвекции мощных нисходящих потоков, которые называют стоки (downrafts). Именно они управляют значительно большими по площади восходящими конвективными потоками и более мелкими турбулентными движениями. Для лучшего понимания причин сложной структуры фотосферных магнитных полей мы приведем ниже характерные черты конвективных процессов на Солнце согласно данным [36].

Восходящие конвективные теплые потоки имеют низкую плотность и среднюю энтропию. Они одновременно поднимаются и растекаются, чтобы сохранялось количество вещества, так как вверху плотность ниже. И только малая часть поднимающегося вещества достигает поверхности, где ее энергию и энтропию уносит излучение, создавая при этом более плотное вещество, которое вследствие гравитации начинает опускаться вниз, формируя нисходящий поток. В низких слоях опускающееся вещество образует мощные стоки вследствие закона сохранения массы, так как внизу более плотные слои, и необходим отвод вещества, которое возвращается из поднимающихся вверх потоков. По краям нисходящих потоков происходят сдвиговые движения, вследствие которых создаются вихри и турбуленция. Восходящие потоки, наоборот, имеют очень низкий уровень флуктуаций, потому что растекание сглаживает все возмущения. В результате мы видим восходящие потоки ламинарными, а нисходящие кажутся турбулентными. Если в эту картину добавить магнитное поле, которое в условиях солнечной плазмы является замороженным в плазму, то станет понятным, почему магнитные силовые линии имеют сложные конфигурации по краям гранул и межгранул.

Взаимосвязь магнитного поля с конвекцией была продемонстрирована в работах по двумерному МГД-моделированию магнитогрануляции [1, 3, 4, 9, 35], и трехмерному [37, 38]. На сильную связь магнитных полей в спокойных областях Солнца с локальными процессами конвекции указывают также и многие наблюдательные факты [14, 29], а также результаты численного моделирования профилей Стокса [6, 7, 15].

В данной работе исходя из результатов синтеза профилей Стокса, а также результатов двумерного МГД-моделирования нестационарной магнитогрануляции мы установили, что главной причиной появления профилей с необычной формой является сложная структура магнитного поля со смешанными полярностями вдоль луча зрения и сложными градиентами напряженности и скорости в пограничных областях гранул и межгранульных промежутков. Ответственные за это — локальные турбулентные процессы в поверхностных слоях магнитогрануляции, которые могут создаваться сдвиговыми движениями на границах мощных нисходящих потоков.

Автор благодарит за участие в дискуссиях, полезные замечания и советы С. Соланки, С. Плонера, М. Шюсслера, а также Е. Хоменко. Эти исследования являются частью международного сотрудничества и частично финансировались INTAS (project 00084) грантом.

1. Атрощенко И. Н., Шеминова В. А. Численное моделирование взаимодействия солнечной грануляции с мелкомасштабными магнитными полями // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 4.—С. 32—45.

2. *Вайнштейн С. И., Зельдович Я. Б., Рузмайкин А. А.* Турбулентное динамо в астрофизике. — М: Наука, 1980.—342 с.
3. *Гадун А. С.* Двумерная нестационарная магнитогрануляция // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 2.—С. 99—120.
4. *Гадун А. С., Шеминова В. А, Соланки С. К.* Формирование мелкомасштабных магнитных структур: поверхностный механизм // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 5.—С. 387—397.
5. *Шеминова В. А.* Глубины формирования магниточувствительных линий поглощения в атмосфере Солнца // Кинематика и физика небес. тел.—1992.—8, № 3.—С. 44—62.
6. *Шеминова В. А.* Двумерные МГД-модели солнечной магнитогрануляции. Динамика магнитных элементов // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 5.—С. 398—411.
7. *Cattaneo F.* On the Origin of Magnetic Fields in the Quiet Photosphere // *Astrophys. J.*—1999.—515, N 1.—P. L39—L42.
8. *Frutiger C., Solanki S. K.* Do solar magnetic elements harbor downflows? // *Astron. and Astrophys.*—1998.—336, N 2.—P. L65—L68.
9. *Gadun A. S., Solanki S. K., Sheminova V. A., Ploner S. R. O.* A formation mechanism of magnetic elements in regions of mixed polarity // *Solar. Phys.*—2001.—203, N 1.—P. 1—7.
10. *Grossmann-Doerth U., Keller C. U., Schüssler M.* Observations of the quiet Sun's magnetic field // *Astron. and Astrophys.*—1996.—315, N 3.—P. 610—617.
11. *Grossmann-Doerth U., Schüssler M., Sigwardth M., Steiner O.* Strong Stokes V asymmetries of photospheric spectral lines: What can they tell us about the magnetic field structure? // *Astron. and Astrophys.*—2000.—357, N 1.—P. 351—358.
12. *Grossmann-Doerth U., Schüssler M., Steiner O.* Convective intensification of solar surface magnetic fields: Results of numerical experiments // *Astron. and Astrophys.*—1998.—337, N 3.—P. 928—939.
13. *Keller C. U., Deubner F.-L., Egger U., et al.* On the strength of solar intra-network fields // *Astron. and Astrophys.*—1994.—286, N 2.—P. 626—634.
14. *Khomenko E. V., Collados M., Solanki S. K., et al.* Quiet-Sun inter-network magnetic fields observed in the infrared // *Astron. and Astrophys.*—2003.—408, N 2.—P. 1115—1135.
15. *Khomenko E. V., Shelyag S., Solanki S. K., et al.* Stokes diagnostics of magneto-convection. Profile shapes and asymmetries // *Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity: IAU Symp. N 223 / Eds A. V. Stepanov, E. E. Benevolenskaya, A. G. Kosovichev.* — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004.—P. 635—636.
16. *Kjeldseth Moe O.* On the magnetic-field configuration in sunspots // *Structure and Development of Solar Active Regions: IUA Symp. 35 / Ed. K. O. Kiepenheuer.* — Dordrecht: Reidel, 1968.—P. 202—210.
17. *Lites B. W., Leka K. D., Skumanich A., et al.* Small-scale horizontal magnetic fields in the solar photosphere // *Astrophys. J.*—1996.—460, N 1.—P. 1019—1026.
18. *Martinez Pillet V., Lites, B. W., Skumanich A.* Active region magnetic fields. I. Plage fields // *Astrophys. J.*—1997.—474, N 2.—P. 810—842.
19. *Ploner S. R. O., Schüssler M., Solanki S. K., Gadun A. S.* An example of reconnection and magnetic flux recycling near the solar surface // *Theory, Observation, and Instrumentation / Ed. M. Sigwarth: ASP Conf. Ser.*—2001.—236.—P. 363—370.
20. *Ploner S. R. O., Schüssler M., Solanki S. K., et al.* The formation of one-lobe Stokes V profiles in an inhomogeneous atmosphere // *Theory, Observation, and Instrumentation / Ed. M. Sigwarth: ASP Conf. Ser.*—2001.—236.—P. 371—378.
21. *Ruedi I., Solanki S. K., Livingston W., Stenflo J. O.* Infrared lines as probes of solar magnetic features. III. Strong and weak magnetic fields in plages // *Astron. and Astrophys.*—1992.—263, N 1/2.—P. 323—338.
22. *Ruedi I., Solanki S. K., Rabin D.* Infrared lines as probes of solar magnetic features. IV. Discovery of a siphon flow // *Astron. and Astrophys.*—1992.—261, N 2.—P. L21—L24.
23. *Sanchez Almeida J., Emmonet T., Cattaneo F.* Polarization of photospheric lines from turbulent dynamo simulations // *Astrophys. J.*—2003.—585, N 1.—P. 536—552.
24. *Sanchez Almeida J., Landi degl'Innocenti E., Martinez Pillet V., Lites B. W.* Physical properties of the solar magnetic photosphere under the MISMA hypothesis. I // *Astrophys. J.*—1996.—466, N 1.—P. 537—548.
25. *Sanchez Almeida J., Lites B. W.* Physical properties of the solar magnetic photosphere under the MISMA hypothesis. II. Network and internetwork fields at the disk center // *Astrophys. J.*—2000.—532, N 2.—P. 1215—1229.
26. *Schüssler M.* MHD simulations: What's next? // *Solar polarization: ASP Conf. Ser. / Eds J. Trujillo Bueno, J. Sanchez Almeida.*—2003.—307.—P. 601—613.
27. *Sigwarth M.* Properties and origin of asymmetric and unusual Stokes V profiles observed in solar magnetic fields // *Astrophys. J.*—2001.—563, N 1.—P. 1031—1044.
28. *Sigwarth M., Balasubramaniam K. S., Knülker M., Schmidt W.* Dynamics of solar magnetic

- elements // *Astron. and Astrophys.*—1999.—349, N 3.—P. 941—955.
29. *Socas-Navarro H., Martinez Pillet V., Lites B. W.* Magnetic properties of the solar internetwork // *Astrophys. J.*—2004.—611, N 2.—P. 1139—1148.
30. *Socas-Navarro H., Sanchez Almeida J.* Magnetic properties of photospheric regions with very low magnetic flux // *Astrophys. J.*—2002.—565, N 2.—P. 1223—1334.
31. *Solanki S. K.* Small-scale solar magnetic fields: an overview // *Space Sci. Rev.*—1993.—31.—P. 1—188.
32. *Solanki S. K., Montavon C. A.* Uncombed fields as the source of the broad-band circular polarization of sunspots // *Astron. and Astrophys.*—1993.—275, N 1.—P. 283—292.
33. *Spruit H. C., Title A. M., van Ballegoijen A. A.* Is there a weak mixed polarity background field? Theoretical arguments // *Solar. Phys.*—1987.—110, N 1.—P. 115—128.
34. *Steiner O.* The formation of asymmetric Stokes V profiles in the presence of a magnetopause // *Solar. Phys.*—2000.—196, N 2.—P. 245—268.
35. *Steiner O., Grossmann-Doerth U., Knülker M., Schüssler M.* Dynamical interaction of solar magnetic elements and granular convection: results of a numerical simulation // *Astrophys. J.*—1998.—495, N 1.—P. 468—484.
36. *Stein R. F., Nordlund A.* Simulation of solar granulation. I. General properties // *Astrophys. J.*—1998.—499, N 2.—P. 914—933.
37. *Stein R. F., Nordlund A.* Solar surface magneto-convection and dynamo action // *SOLMAG 2002: Proc. of the Magnetic Coupling of the Solar Atmosphere Euroconference and IAU Colloquium 188, 11—15 June 2002, Santorini, Greece / Ed. H. Sawaya-Lacoste. — Noordwijk: ESA Publ. Division, 2002.—P. 83—89.—(ESA SP-505)*
38. *Vogler A., Shelyag S., Schüssler M., et al.* Simulations of magneto-convection in the solar photosphere // *Astron. and Astrophys.*—2005.—429, N 1.—P. 335—351.

Поступила в редакцию 06.04.05