КИНЕМАТИКА
И ФИЗИКА
НЕБЕСНЫХ
ТЕЛ том 16 № 3 2000

УДК 523.98

Движения плазмы над тенью солнечного пятна вблизи уровня фотосфера — хромосфера. Структура магнитного поля

О. С. Гопасюк

Крымская астрофизическая обсерватория
98409, п. Научный, Крым, Украина

*Изучалась структура поля скоростей по наблюдениям в линиях Fe I λ 527.0 нм, Mg I λ 517.3 нм и продольного магнитного поля по наблюдениям в линии Fe I λ 525.3 нм. По продольной составляющей восстановлены все три составляющие векторов скорости и магнитного поля. В области формирования линий Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм скорости малы, и поле скоростей нестационарно. Средние значения углов между вектором магнитного поля и векторами скорости, вычисленными из наблюдений в Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм, практически одинаковые (54° и 52°). Значение вертикального градиента магнитного поля, вычисленного из условия div***H*** = 0 и составляющих вектора магнитного поля, составило −0.03 мТл/км. Оценены угол раствора, шаг спирали силовых линий магнитного поля и величина тока, текущего вдоль магнитной оси тени пятна.*

*РУХ ПЛАЗМИ НАД ТІННЮ СОНЯЧНОЇ ПЛЯМИ ПОБЛИЗУ РІВНЯ ФОТОСФЕРА — ХРОМОСФЕРА. СТРУКТУРА МАГНІТНОГО ПОЛЯ, Гопасюк О. С. — Вивчалася структура поля швидкостей за спостереженнями в лініях Fe I λ 527.0 нм, Mg I λ 517.3 нм та поздовжнього магнітного поля за спостереженнями в лінії Fe I λ 525.3 нм. По поздовжній складовій відновлені всі три складові векторів швидкості та магнітного поля. В області формування ліній Fe I λ 527.0 нм і Mg I λ 517.3 нм швидкості малі, і поле швидкостей нестаціонарне. Середні значення кутів між вектором магнітного поля і векторами швидкості, отримані зі спостережень в Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм, практично однакові (54° и 52°). Значення вертикального градієнта магнітного поля, обчисленого з умови div***H*** = 0 і складових вектора магнітного поля, складає −0.03 мТл/км. Оцінено кут розкриття, крок спіралі силових ліній магнітного поля і величина струму, що тече вздовж магнітної осі тіні плями.*

PLASMA MOTIONS ABOVE SUNSPOT UMBRA NEAR THE PHOTOSPHERE — CHROMOSPHERE LEVEL. MAGNETIC FIELD STRUCTURE, by Gopasyuk O. S. — Measurements of velocity field in the Fe I λ 527.0 nm and Mg I λ 517.3 nm lines and longitudinal magnetic field in the Fe I

© О. С. ГОПАСЮК, 2000

*λ 525.3 nm line over the umbrae of four spots were used to study the structure of both fields. We reconstructed all three components of both the magnetic and velocity field vectors from their line-of-sight components. The velocities are small in the regions of the Fe I λ 527.0 nm and the Mg I λ 517.3 nm line formation. The average angles between the magnetic field vector and the velocity field vectors calculated from the observations in the Fe I λ 527.0 nm and Mg I λ 517.3 nm are practically the same (54° and 52°). The vertical gradient of the magnetic field calculated from the condition div***H** *= 0 and the magnetic field components is approximately −0.03 mT/km. The beam angle and the pitch of the helix of magnetic field lines and the vertical electric current are estimated.*

Движения вещества в пятне, их связь с магнитным полем на разных уровнях атмосферы Солнца изучались в основном в полутени пятна. Детальный обзор этих исследований приведен в монографии [12]. Движения Эвершеда [16] в полутени пятна в фотосфере, характеризующиеся растеканием плазмы от центра пятна вдоль поверхности Солнца по расходящимся силовым линиям магнитного поля, имеют максимальную скорость 2 км/с [19], а в некоторых случаях 6—8 км/с [14, 20]. При этом максимум скорости находится у внутренней границы полутени. Наблюдения, проведенные в фотосферных линиях Fe I λλ 525.3 и 512.4 нм, показали, что в тени пятна движения газа происходят преимущественно поперек силовым линиям магнитного поля и вниз [6]. Среднее по четырем пятнам значение угла между векторами скорости и магнитного поля составило 65° [6]. В хромосфере над центральной частью тени пятна движения плазмы направлены вверх и преимущественно вдоль магнитного поля. Средняя по четырем пятнам скорость плазмы и угол между векторами магнитного поля и скорости соответственно равны 0.7 км/с и 27° [2].

Не исследованными оказались движения плазмы над тенью пятна в переходной области между фотосферой и хромосферой и связь этих движений с магнитным полем.

Структура магнитного поля отдельного пятна представляется как симметричный расходящийся с высотой веер силовых линий [10]. В полутени пятна преобладает, как правило, поперечное поле, а в тени — вертикальное.

Вертикальные градиенты магнитного поля пятен определялись двумя способами: 1) из наблюдений по фотосферным линиям вектора магнитного поля и условия div**H** = 0 и 2) из одновременных поляризационных наблюдений спектральных линий различной силы. В рамках первого метода среднее значение вертикального градиента по многим наблюдениям оказалось равным 0.06—0.07 мТл/км, что близко соответствует расхождению силовых линий в диполе. В то же время при использовании второго метода значения вертикального градиента существенно расходились и зависели от того, какая спектральная линия была выбрана для измерения поля на верхнем уровне (см. [5, 12]).

Восстановление всех трех составляющих векторов магнитного поля и скорости по продольной составляющей [6] дает новые возможности в исследовании магнитного поля и движений плазмы в одиночных пятнах.

Здесь продолжены начатые в работе [6] исследования движений плазмы, структуры магнитного поля и связи между ними в тени одиночных пятен. Наблюдения поля скоростей проведены в линиях Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм, которые образуются вблизи переходной области между фотосферой и хромосферой, и продольного магнитного поля в фотосферной линии Fe I λ 525.3 нм. По лучевой составляющей были восстановлены все

три составляющие векторов магнитного поля и скорости, которые стали основой для продолжения исследований.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились на двойном магнитографе [11] солнечного башенного телескопа Крымской астрофизической обсерватории в сентябре 1978 г. Измерялись продольные магнитные поля, лучевые скорости и яркости в фотосферной линии Fe I λ 525.3 нм, в линии Fe I λ 527.0 нм, центральная часть которой образуется вблизи уровня смены знака движений Эвершеда [3, 17], и в хромосферной линии Mg I λ 517.3 нм. Наблюдения велись одновременно в двух линиях: на первом фотометре поочередно устанавливались либо линия Fe I λ 527.0 нм, либо линия Mg I λ 517.3 нм. На втором фотометре была постоянно установлена линия Fe I λ 525.3 нм.

Входная щель спектрографа составляла $1'' \times 2''$. Сканирование изображения Солнца относительно щели спектрографа осуществлялось с помощью фотогида [8] вдоль суточной параллели со скоростью $2.23''$/с. Постоянная времени каждого из каналов магнитографа — около 1 с. Расстояние между центрами соседних сканов было равным $2.67''$; длина сканов — $170''$. С обеих сторон пятен имелись довольно протяженные участки невозмущенной атмосферы, что позволило довольно надежно определять нуль-пункт локальных скоростей [7].

Линия Fe I λ 525.3 нм имеет простое магнитное расщепление и фактор Ланде g = 1.5. Эквивалентная ширина ее в центре солнечного диска составляет 7.5 пм. Потенциал возбуждения нижнего уровня этой линии равен 3.28 эВ [23]. Она слабо чувствительна к температуре; в пятне несколько усиливается [23]. При регистрации магнитного поля и доплеровских движений в Fe I λ 525.3 нм входные щели фотометра пропускали свет в интервале от 3.5 до 9.0 пм от центра линии и в пределах ± 3.5 пм от центра линии при регистрации яркости в ядре линии. Напряженность магнитного поля, при котором происходил сдвиг центра σ-компонентов на середину щелей фотометра, составляла 323.8 мТл.

Линия Mg I λ 517.3 нм имеет сложное магнитное расщепление и средневзвешенное по интенсивности σ-компонентов значение g = 1.750 [4]. Эквивалентная ширина ее в центре солнечного диска составляет 125.9 пм. Потенциал возбуждения нижнего уровня этой линии равен 2.71 эВ [23]. В пятне она сильно усиливается [23].

Линия Fe I λ 527.0 нм имеет сложное магнитное расщепление и средневзвешенное по интенсивности σ-компонентов значение g = 1.200 [4]. Эквивалентная ширина ее в центре солнечного диска составляет 47.8 пм. Потенциал возбуждения нижнего уровня этой линии равен 0.86 эВ [23]. Она сильно усиливается в пятне [23].

Сигналы магнитного поля прокалиброваны согласно [1], а лучевые скорости — на основе регистраций вдоль линии экватора сигналов скорости вращения Солнца. Одновременно проводились измерения яркости в ядре соответствующей линии для того, чтобы осуществить привязку данных калибровки к центральному меридиану на поверхности Солнца. Всего было проведено 42 серии наблюдений в четырех одиночных пятнах. Данные о положении пятен (долгота L и широта φ) для средних моментов каждой серии наблюдений приведены в табл. 1 [6]. Для анализа были использованы 11 записей четырех одиночных пятен, проведенных одновременно в Fe I λ 525.3 нм и Fe I λ 527.0 нм и 9 записей четырех одиночных пятен, проведенных одновременно в Fe I λ 525.3 нм и Mg I λ 517.3 нм.

СТРУКТУРА ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В Fe I λ 527.0 НМ И Mg I λ 517.3 НМ

Для анализа структур полей использовались регистрации сигнала яркости I в Fe I λ 525.3 нм, выраженные в единицах средней яркости соседнего невозмущенного фона. По каждой карте яркости I в тени пятна были выделены две зоны: 1) $I \leq 0.5$ и 2) $0.5 < I \leq 0.7$. Методика обработки подробно изложена в [6].

Карты магнитного поля, лучевых скоростей и яркостей были построены с сеткой $2.37'' \times 2.67''$. На рис. 1 показаны фрагменты карт магнитного поля в линии Fe I λ 525.3 нм и поля скоростей в линиях Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм, относящиеся к наблюдениям в пятне 16.09.78.

Анализ карт лучевых скоростей в линиях Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм (рис. 1 *б, в*) показал, что скорость в тени пятна неоднородна. Структура поля скоростей сильно изрезана нулевой линией в отличие от поля скоростей в фотосфере [6] и хромосфере [2]. Скорости противоположных знаков занимали как первую, так и вторую зоны тени пятна. Характерным было то, что скорости в этих линиях малы по сравнению со скоростями, наблюдаемыми в фотосфере (Fe I λ 525.3 нм). Их максимальные значения не превышали 1.2 км/с.

На рис. 2 представлена зависимость средней по зоне лучевой скорости $\overline{V}_{\parallel}$ от $\sin\Theta$. Изменения величины скорости от записи к записи, а иногда и ее знака, говорят о том, что поле скоростей на высотах образования линий

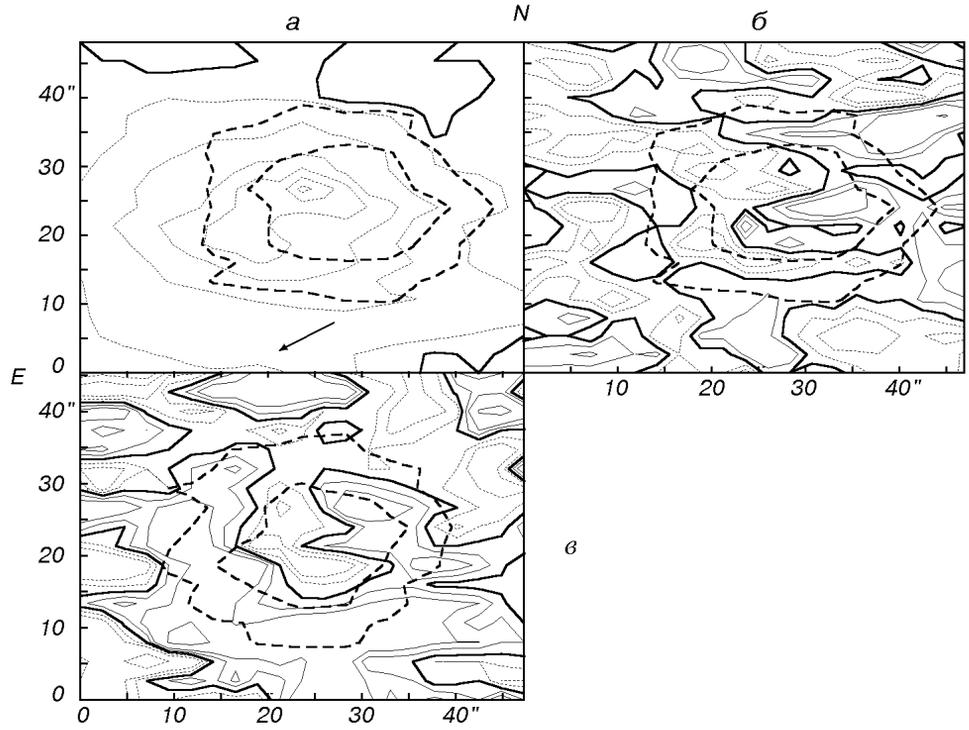

Рис. 1. Карты продольного магнитного поля и поля скоростей в одиночном пятне 16.09.78 ($L \approx 23°$; $\varphi \approx 16°$): *а* — продольное магнитное поле, измеренное в линии Fe I λ 525.3 нм, *б, в* — лучевые скорости (Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм). Штриховые линии — поля N-полярности и движений плазмы к наблюдателю, сплошные — S-полярности и движений от наблюдателя. Сплошные жирные линии разделяют области противоположных полярностей и встречных движений. Изолинии магнитного поля: ±10, 50, 100, 150, 200, 250 мТл; поля скоростей: ±100, 200, 500, 1000 м/с. Жирные штриховые линии — границы зон яркости 0.5 и 0.7. Стрелкой показано направление на центр солнечного диска

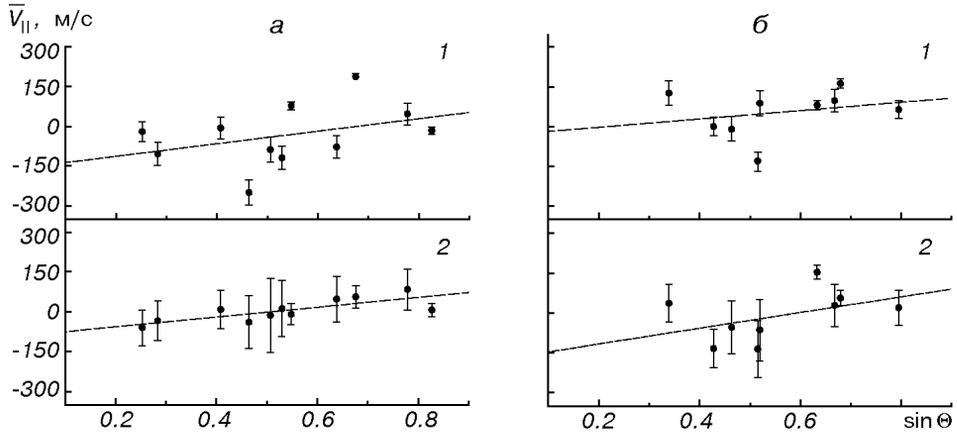

Рис. 2. Изменение с переходом от центра к краю солнечного диска средних по площади зоны лучевых скоростей, *а* — измеренных в линии Fe I λ 527.0 нм, *б* — измеренных в линии Mg I λ 517.3 нм. Нанесены величины вероятных ошибок. Цифрами отмечены зоны, выделенные по яркости: $I \leq 0.5$ (*1*) и $0.5 < I \leq 0.7$ (*2*)

Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм нестационарно. По наблюдениям в линии Fe I λ 527.0 нм (рис. 2, *а*) для центральной зоны ($I \leq 0.5$) преобладающими являлись потоки с отрицательным знаком. Три из одиннадцати записей показали средние положительные скорости, остальные — отрицательные. Величина средней скорости не превышала −300...+200 м/с. Она в среднем увеличивалась с удалением пятна от центрального меридиана, становясь положительной. В этой зоне наблюдалось опускание вещества в пятнах вблизи центрального меридиана. Во второй зоне ($0.5 < I \leq 0.7$) число записей, показавших средние положительные и отрицательные скорости, примерно одинаково, и скорости также увеличивались к лимбу, но они были меньше, чем в первой зоне (−60...+80 м/с).

По наблюдениям в линии Mg I λ 517.3 нм характерными для центральной зоны тени пятна являлись потоки с положительными скоростями. Из девяти записей только в двух наблюдались отрицательные скорости. Средняя по зоне величина скорости не превышала 200 м/с. Она также увеличивалась к лимбу. Для второй зоны движения с положительными и отрицательными скоростями регистрировались приблизительно равное число раз. Средние скорости были в пределах ±150 м/с.

Исследуемые нами четыре пятна были одиночными, поэтому магнитное поле и движение плазмы в них наименее подвержены влиянию, связанному с окружающими магнитными структурами. Их структуры наиболее близко соответствуют случаю азимутальной симметрии. Учитывая это, мы применили к данным наблюдений методику исследований, изложенную в работе [6]. По лучевой составляющей были восстановлены все три составляющие векторов скорости и магнитного поля: z (вертикальная), r (радиальная — вдоль радиуса пятна) и ω (азимутальная). Результаты вычислений составляющих скорости и величины их вероятных ошибок представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что для движений плазмы по наблюдениям в линии Fe I λ 527.0 нм как в первой, так и во второй зонах характерно преобладание радиальной составляющей вектора скорости. Вблизи центра солнечного диска ($\sin\Theta \leq 0.5$) в обеих зонах V_z имела отрицательные значения. При $\sin\Theta > 0.5$ она была преимущественно положительной. Радиальная и азимутальная составляющие в обеих зонах для $\sin\Theta \leq 0.5$ были в среднем положительными, а для $\sin\Theta > 0.5$ — отрицательными.

Таблица 1. Составляющие вектора скорости и угол между вектором магнитного поля в Fe I λ 525.3 нм и вектором скорости

sinΘ	I < 0.5				0.5 < I < 0.7			
	V_z, м/с	V_r, м/с	V_ω, м/с	γ, град	V_z, м/с	V_r, м/с	V_ω, м/с	γ, град
				Fe I λ 527.0 нм				
0.2525	−20±17	257±42	540±42	68± 8	−59±13	378±31	291±31	39±18
0.2836	−76 16	−950 36	−294 36	65 2	−34 12	−236 27	328 27	86 4
0.4081	−8 17	130 31	351 31	51 16	9 12	127 23	67 23	26 19
0.4642	−282 16	−65 27	−29 27	25 9	−43 11	28 19	85 19	53 14
0.5063	−102 16	64 26	101 26	60 2	−14 9	−35 15	−30 15	20 1
0.5296	−146 17	−189 27	−83 27	40 1	15 11	39 17	−43 17	59 15
0.5476	96 29	−160 45	345 45	70 11	−8 17	−193 27	82 27	69 8
0.6381	−109 18	−343 25	−77 25	66 2	64 12	−121 17	−76 17	80 7
0.6755	253 35	−179 46	−64 46	67 19	81 18	236 24	−58 24	33 11
0.7782	84 20	274 23	7 23	42 17	130 14	204 16	8 16	8 15
0.8261	32 37	−456 38	−147 38	71 5	43 27	−256 28	−130 28	83 7
				Mg I λ 517.3 нм				
0.3401	134 16	−144 32	267 32	66 7	36 12	−383 26	122 26	77 3
0.4284	0 18	116 33	−58 33	0 0	−145 12	−299 23	231 23	61 1
0.4642	−12 16	124 28	−74 28	63 8	−62 11	−302 19	10 19	59 9
0.5158	−142 17	−397 28	145 28	61 2	−162 11	−379 17	39 17	39 1
0.5200	102 16	−17 25	339 25	64 9	−60 10	−417 16	153 16	41 1
0.6337	89 28	−244 38	261 38	72 10	193 22	−205 31	116 31	55 18
0.6682	131 18	−139 24	45 24	68 14	41 13	−191 17	82 17	70 4
0.6796	223 29	68 38	196 38	30 15	59 22	−273 29	−100 29	50 4
0.7957	107 22	54 24	117 24	38 15	32 16	−86 17	70 17	69 8

Знаки V_z и V_r для sinΘ ≤ 0.5 показывают движения, характерные для тени пятна в фотосфере [6], хотя величины самих скоростей по крайней мере в пять раз меньше. Смена знака составляющих скорости при sinΘ > 0.5, возможно, связана с переходом к более высоким слоям из-за увеличения высоты формирования линии в пятне при переходе его к лимбу.

По наблюдениям в линии Mg I λ 517.3 нм все три составляющие по величине также небольшие, и в среднем близки между собой (табл. 1). Составляющие V_z и V_ω в первой зоне, за исключением двух случаев, положительные. В то же время V_r имела и положительные, и отрицательные значения. Знак вертикальной составляющей показывает, что в центральной зоне тени пятна материя двигалась вверх, как и в хромосфере [2]. Во второй зоне плазма втекала в пятно и двигалась как вверх, так и вниз.

СВЯЗЬ ДВИЖЕНИЙ ПЛАЗМЫ С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Как видно из рис. 1, *а*, в отличие от карт поля скоростей в Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм (рис. 1, *б*, *в*), площадь обеих зон полностью занята магнитным полем одного знака, и линия смены знака продольной составляющей магнитного поля находилась за пределами тени пятна. Для определения всех трех составляющих вектора магнитного поля, H_z, H_r, H_ω, мы использовали методику, изложенную в [6]. Результаты вычислений и величины их вероятных ошибок приведены в табл. 2.

Имея вертикальную, радиальную и азимутальную составляющие обоих векторов, мы, как и в [6], вычислили угол γ между вектором магнитного поля и вектором скорости. Значения угла γ и величины его вероятной ошибки приведены в табл. 1. Видно, что угол между обоими векторами довольно большой, его среднее значение равно 54° для скоростей в Fe I λ 527.0 нм и 52° для скоростей в Mg I λ 517.3 нм.

Таблица 2. Составляющие вектора магнитного поля в фотосфере (Fe I λ 525.3 нм)

sinΘ	I ≤ 0.5						0.5 < I ≤ 0.7					
	H_z, мТл		H_r, мТл		H_ω, мТл		H_z, мТл		H_r, мТл		H_ω, мТл	
в паре с Fe I λ 527.0 нм												
0.2525	171.0±0.6		126.1±1.6		33.7±1.6		90.6±0.5		102.4±1.2		118.6±1.2	
0.2836	153.0	0.6	40.4	1.4	101.9	1.4	86.2	0.5	55.2	1.1	38.2	1.1
0.4081	125.8	0.7	118.3	1.3	90.9	1.3	79.6	0.5	130.4	0.9	62.0	0.9
0.4642	173.9	0.6	30.3	1.1	61.6	1.1	114.7	0.4	102.3	0.7	106.0	0.7
0.5063	194.7	0.6	42.8	1.0	15.7	1.0	95.0	0.4	131.0	0.6	66.3	0.6
0.5296	162.5	0.7	45.7	1.1	6.1	1.1	90.2	0.4	59.4	0.7	7.6	0.7
0.5476	122.3	1.2	13.1	1.8	20.2	1.8	81.8	0.7	74.0	1.1	64.2	1.1
0.6381	181.1	0.7	18.7	1.0	13.6	1.0	100.6	0.5	72.8	0.7	13.7	0.7
0.6755	158.5	1.4	78.8	1.8	49.1	1.8	95.0	0.7	129.0	0.9	43.8	0.9
0.7782	186.3	0.8	111.1	0.9	8.7	0.9	83.0	0.6	117.6	0.7	23.0	0.7
0.8261	144.6	1.5	54.6	1.4	29.8	1.4	108.8	1.1	30.7	1.1	6.2	1.1
в паре с Mg I λ 517.3 нм												
0.3401	189.3	0.6	3.3	1.3	2.0	1.3	92.3	0.5	29.5	1.0	−8.4	1.0
0.4284	186.7	0.7	40.6	1.3	29.2	1.3	80.0	0.5	15.4	0.9	2.0	0.9
0.4642	134.4	0.7	55.6	1.1	71.7	1.1	88.0	0.5	55.0	0.8	102.1	0.8
0.5158	149.9	0.7	35.8	1.1	16.9	1.1	97.7	0.4	54.3	0.7	11.9	0.7
0.5200	208.5	0.6	127.3	0.9	57.5	0.9	78.2	0.4	102.8	0.6	20.6	0.6
0.6337	113.0	1.2	5.8	1.7	15.6	1.7	64.3	0.8	15.1	1.1	24.6	1.1
0.6682	146.1	0.7	57.0	1.0	10.0	1.0	90.1	0.5	60.5	0.7	0.2	0.7
0.6796	137.0	1.2	94.9	1.5	43.8	1.5	84.8	0.9	106.8	1.1	23.6	1.1
0.7957	112.0	1.0	72.1	1.1	16.2	1.1	80.8	0.6	96.4	0.7	8.2	0.7

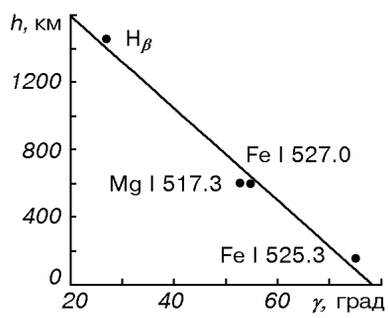

Рис. 3. Средние величины угла γ в зоне 1 в зависимости от высоты h образования линий (с переходом от фотосферы к хромосфере)

На рис. 3 показано изменение угла γ с переходом от фотосферы к хромосфере. Данные об углах γ в фотосфере (наблюдения в Fe I λ 525.3 нм) взяты из [6], в хромосфере (наблюдения в H_β) — из [2]. Высоты образования линий от непрерывного спектра в пятне взяты из данных измерений [21] для H_β, для линий Fe I $\lambda\lambda$ 525.3 и 527.0 нм — из [22]. Высота образования линии Mg I λ 517.3 нм от непрерывного спектра для невозмущенной атмосферы взята из [15]. Вероятно, высота образования линии Mg I λ 517.3 нм находится несколько выше, чем для невозмущенной атмосферы, так как поле скоростей, измеренное в этой линии, имеет структуру, более близкую к хромосферной. Однако высота ее образования, вероятно, немного выше, чем для линии Fe I λ 527.0 нм (структура поля скоростей в Fe I λ 527.0 нм ближе к фотосферной).

Мы видим, что на уровне фотосферы (наблюдения в Fe I λ 525.3 нм) движение плазмы в тени пятна происходит преимущественно поперек магнитного поля. С переходом в верхние слои атмосферы плазма движется преимущественно вдоль магнитного поля (наблюдения в H_β [2]). Признаки движения плазмы вверх проявляются уже по наблюдениям в Mg I λ 517.3 нм, хотя угол γ достаточно большой (52°—54°).

СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ. НАБЛЮДЕНИЯ В Fe I λ 525.3 НМ

Во всех предыдущих работах вертикальный градиент магнитного поля определялся либо из данных наблюдений вектора поперечного поля и условия div**H** = 0, либо из одновременных наблюдений спектральных линий разной силы. В этой работе вертикальный градиент определяется на основании вычисленных по продольной составляющей составляющих вектора магнитного поля и условия

$$\mathrm{div}\mathbf{H} = 0. \tag{1}$$

Интегрирование (1) по r в предположении осевой симметрии поля

$$\frac{\partial}{\partial\omega} = 0 \tag{2}$$

дает выражение для вертикального градиента в центральной (первой) зоне

$$\frac{\partial H_z}{\partial z}(1) = -2\frac{H_r(1)}{r(1)} \tag{3}$$

и в кольцевой (второй) зоне

$$\frac{\partial H_z}{\partial z}(2) = -2\frac{r(2)H_r(2) - r(1)H_r(1)}{r^2(2) - r^2(1)}. \tag{4}$$

При интегрировании по радиусу r зоны пятна считалось, что в пределах одной зоны

$$\frac{\partial H_z}{\partial z} = \mathrm{const}.$$

Для более полного анализа структуры магнитного поля, измеренного в линии Fe I λ 525.3 нм, мы объединили все данные, полученные в парах с Fe I λ 527.0 нм, Mg I λ 517.3 нм и H_β. Данные каждой составляющей для первой и второй зон были усреднены по четырем пятнам. Процесс усреднения проводился посредством нанесения всех значений каждой составляющей по четырем пятнам на зависимости от sinΘ. По ним проводилась прямая линия $y = a\sin\Theta + b$ методом наименьших квадратов и определялись ее коэффициенты. Это позволило привести величину каждой составляющей, усредненной по четырем пятнам, к положению пятна, наиболее близко расположенного к центру солнечного диска (sinΘ = 0.2525; табл. 2).

Эти значения составляющих для первой и второй зон приведены в табл. 3. Она показывает, что в центральной зоне тени пятна H_z больше, чем во второй, периферийной, зоне и в соответствии с этим в первой зоне H_r и H_ω меньше. Это находится в хорошем качественном согласии с представлениями о том, что силовые линии магнитного поля пятна расходятся в виде веера от его магнитной оси. Таким же методом были усреднены и приведены к значениям при sinΘ = 0.2525 и радиусы зон. Величины их приведены в табл. 3. На основе (3), (4) и данных табл. 3 были вычислены вертикальные градиенты магнитного поля. Значение градиента составило −0.03 мТл/км в центральной зоне тени пятна и −0.02 мТл/км во внешней кольцевой зоне.

Таблица 3. Усредненные по четырем пятнам и приведенные к положению на диске Солнца для sinΘ = 0.2525 значения составляющих поля и радиуса зоны

	H_r, мТл	H_ω, мТл	H_z, мТл	r, км
$I \le 0.5$	109.4	72.4	186.8	7000
$0.5 < I \le 0.7$	138.5	94.3	102.3	12400

Эти значения в среднем несколько меньше тех, которые были получены другими исследователями ранее из наблюдений поперечного поля и условия (1) [5, 12]. Причина может быть в том, что наши данные соответствуют тени пятна, в то время как ранее измеренные поперечные поля относятся главным образом к полутени.

Радиальная составляющая (табл. 3) показывает, что силовые линии поля в тени пятна расходятся с высотой. Угол расхождения оценим на основе выражения

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{H_r}{H_z}. \tag{5}$$

Подставляя в (5) данные H_r и H_z из табл. 3, находим $\alpha \approx 30°$ для первой зоны и — $\alpha \approx 37°$ для второй. Таким образом, силовые линии магнитного поля в первой зоне расходятся в пределах 30°, а во второй — от 30° до 37°.

Расходящиеся с высотой силовые линии закручиваются. Величина их закрученности определяется азимутальной составляющей H_ω. Шаг спирали силовых линий можно оценить на основе одного из уравнения силовых линий. При условии, что H_z/H_r не изменяется с высотой, интегрирование уравнений силовых линий дает

$$\Delta z \approx 2\pi r \frac{H_z}{H_\omega}.$$

Воспользовавшись данными табл. 3, находим для зоны 1

$$\Delta z \approx 2\pi r(1) \frac{H_z(1)}{H_\omega(1)} \approx 2\pi r(1)2.6$$

и для зоны 2

$$\Delta z \approx 2\pi r(2) \frac{H_z(2)}{H_\omega(2)} \approx 2\pi r(2)2.6.$$

Эти оценки показывают, что шаг спирали магнитного поля пятна зависит от радиуса. Такое поле является устойчивым по отношению к конвективным перестановкам отдельных жгутов [9]. Наличие азимутальной составляющей H_ω говорит о том, что вдоль магнитной оси пятна течет ток. Величина тока на уровне фотосферы, необходимая для создания азимутального поля данной величины на внешних границах зон 1 и 2, определена на основании выражения [13]:

$$J = \frac{cH_\omega r}{2}.$$

С учетом данных табл. 3 для зоны 1 $J(1) \approx 2.5 \cdot 10^{12}$ А, а для зон 1 и 2 $J(2) \approx 5.8 \cdot 10^{12}$ А. При равномерном распределении тока по сечению тени пятна плотность тока соответственно равна $j(1) \approx 1.6 \cdot 10^4$ А/км^2 и $j(2) \approx$ $\approx 1.2 \cdot 10^4$ А/км^2. Вычисленная плотность тока не сильно превышает те значения, которые получены непосредственно из данных наблюдений поперечного поля [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили установить, что над тенью пятна в области формирования линий Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм скорости малы (в среднем 200—300 м/с) и поле скоростей нестационарно. На этих высотах происходит переход от движений, характерных для фотосферы, к движениям, характерным для хромосферы. В центральной зоне тени пятна для пятен, находящихся вблизи центра солнечного диска ($\sin\Theta \leq 0.5$) движения в Fe I λ 527.0 нм имеют направление, характерное для фотосфе-

ры, т. е. наблюдается опускание вещества и его растекание [6]. Для пятен с $\sin\Theta > 0.5$ характерно втекание материи в пятно и движение ее вверх. Это находит объяснение в увеличении высоты формирования линий над пятном с переходом его к краю солнечного диска. Именно такие движения, особенно в первой зоне, показывают наблюдения в Mg I λ 517.3 нм. Преобладающей составляющей движений является радиальная.

Средние значения углов γ между вектором магнитного поля и векторами скорости, определенные по линиям Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм практически одинаковы и довольно большие: 54° и 52°. Это естественно, так как структуры поля скоростей, измеренных по линиям Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм, очень близки между собой (рис. 1, *б, в*) и соответствуют высотам над пятном, в окрестности которых происходит смена знака движений Эвершеда при переходе от фотосферы к хромосфере. Взятое магнитное поле в обоих случаях относится к фотосфере. Полученные средние значения углов γ, показывающие ориентацию движения плазмы относительно магнитного поля, занимают промежуточное положение между углами, полученными для фотосферы [6] и хромосферы [2].

То, что движения вверх, характерные для хромосферы, имеют место при больших углах между вектором скорости и вектором магнитного поля, скорее всего является следствием более изотропного крупномасштабного поля скоростей на высотах образования линий Fe I λ 527.0 нм и Mg I λ 517.3 нм. Зависимость γ от высоты образования линий (рис. 3), по которым исследованы движения плазмы, показывает, что наиболее слабая линия (Fe I λ 525.3 нм) образуется в самых глубоких слоях тени пятна — им соответствует движение плазмы преимущественно поперек магнитного поля. С увеличением интенсивности уменьшается глубина образования линий. Линия H_β расположена в самых высоких слоях над тенью пятна, где движения материи направлены преимущественно вдоль магнитного поля.

Значения вертикального градиента, которые получены на основе составляющих вектора магнитного поля, восстановленных по наблюдениям продольной составляющей в Fe I λ 525.3 нм, как для первой, так и для второй зоны тени пятна близки. По данным, усредненным по четырем пятнам и приведенным к значениям у центрального меридиана ($\sin\Theta = 0.2525$), они равны −0.03 и −0.02 мТл/км соответственно. Они оказались несколько меньше тех, которые были получены другими авторами по наблюдениям непосредственно поперечного магнитного поля с использованием (1) [5, 12]. Однако напомним, что оценки градиентов, полученные нами, относятся непосредственно к данным в тени пятна, а измерения поперечного поля — к полутени пятна. Кроме того, согласно исследованиям [18] величина вертикального градиента поля пятна тем меньше, чем сильнее закручены его силовые линии. Поскольку закрученность силовых линий магнитного поля у разных пятен различна, то не приходится ожидать одинаковых градиентов поля у всех пятен.

Магнитное поле расходится с высотой. Угол раствора силовых линий в тени пятна по наблюдениям четырех пятен составил 37°. Расходящиеся с высотой силовые линии закручиваются. Проведенные оценки показали, что шаг спирали силовых линий в центральной зоне тени пятна больше. Магнитное поле, шаг спирали силовых линий которого изменяется с радиусом, является устойчивым по отношению к конвективной неустойчивости [9]. По азимутальной составляющей оценена величина тока, текущего вдоль магнитной оси тени пятна. Она оказалась равной $2.5 \cdot 10^{12}$ А в первой — центральной зоне и $5.8 \cdot 10^{12}$ А в первой и второй зонах вместе. Плотности тока при равномерном распределении тока по тени пятна

соответственно равны $1.6 \cdot 10^4$ А/км^2 и $1.2 \cdot 10^4$ А/км^2. Полученные величины плотности тока оказались несколько выше тех, которые были получены непосредственно по данным наблюдений поперечного поля [5]. Пока трудно сказать, эти значения действительно завышены или являются следствием того, что разные пятна имеют разную закрученность силовых линий.

Приношу глубокую благодарность С. И. Гопасюку за постоянное внимание к работе и Н. И. Райковой за частичную обработку наблюдений.

1. *Ганджа С. И., Гопасюк С. И., Тарасова Т. Н.* Наблюдения магнитных полей активной области на Солнце в трех линиях с помощью магнитографа // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—**10**, № 4.—С. 36—47.
2. *Гопасюк О. С.* Движения плазмы в магнитном поле солнечного пятна. II. Наблюдения в линии H_β // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—**15**, № 5.—С. 413—420.
3. *Гопасюк С. И.* Особенности поля скоростей в пятне // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—**66**.—С. 77—82.
4. *Гопасюк С. И.* Измерения солнечных магнитных полей вне пятен по линиям разной силы // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1985.—**72**.—С. 159—171.
5. *Гопасюк С. И.* Структура и динамика магнитного поля в активных областях на Солнце. — М.: ВИНИТИ, 1987.—**34**—С. 6—77.—(Итоги науки и техники. Сер. Астрономия. Солнечные вспышки).
6. *Гопасюк С. И., Гопасюк О. С.* Движения плазмы в магнитном поле солнечного пятна. I. Наблюдения по фотосферным линиям // Кинематика и физика небес. тел.—1998.—**14**, № 5.—С. 389—400.
7. *Гопасюк С. И., Огирь М. Б., Цап Т. Т.* Некоторые особенности активных областей на Солнце во время вспышек // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1963.—**30**.—С. 148—160.
8. *Границкий Л. В., Границкая Л. А., Дидковский Л. В., Никулин Н. С.* Система сбора и обработки информации на башенном солнечном телескопе Крымской астрофизической обсерватории // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1977.—**56**.—С. 181—188.
9. *Кадомцев Б. Б.* Гидродинамическая устойчивость плазмы // Вопросы теории плазмы. — М.: Госатомиздат, 1963.—Вып. 2.—С. 132—176.
10. *Каулинг Т.* Магнитная гидродинамика. — М.: Изд-во иностр. лит., 1959.—130 с.
11. *Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т.* Исследование глобальных колебаний Солнца: I. Метод и инструмент // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1982.—**65**.—С. 3—34.
12. *Обридко В. Н.* Солнечные пятна и комплексы активности. — М.: Наука, 1985.—255 с.
13. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. — М.: ГИТТЛ, 1956.—620 с.
14. *Abetti G.* Solar Physics // Handbuch der Astrophysik.—1929.—**4**.—P. 57—228.
15. *Athay R. G.* Depth of formation of Mg I lines in the solar atmosphere // Astrophys. J.—1963.—**138**, № 3.—P. 680—692.
16. *Evershed J.* Radial movement in sunspot // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1909.—**69**, N 5.—P. 454—457.
17. *Gopasyuk S. I.* Velocity field and some aspects of solar activity // The Sun: Proc. 10th European regional astronomy meeting of the IAU, Praha, Czechoslovakia / Eds L. Hejna, M. Sobotka. — 1987.—Vol. 1.—P. 137—145.
18. *Gopasyuk S. I., Gopasyuk O. S., Tarasova T. N., Shakhovskaya A. N.* Vertical gradients of the magnetic fields in active regions // Solar Phys.—1996.—**168**, N 1.—P. 65—74.
19. *Kinman T. D.* Motions in the Sun at the photospheric level. II. The Evershed effect in sunspot Mt. Wilson N 9987 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1952.—**112**, N 4.—P. 425—444.
20. *Maltby P.* Note on the Evershed effect in sunspots // Ann. Astrophys.—1960.—**23**, N 6.—P. 983—985.
21. *Mattig W.* Über die Cromosphére der Sonnenflecken // Z. Astrophys.—1962.—**56**, N 3.—P. 161—180.
22. *Mattig W.* Geometrical height-scale and the pressure equilibrium in the sunspot umbra // Solar Phys.—1969.—**8**, N 2.—P. 291—309.
23. *Moore Ch. E., Minnaert M. G. J., Houtgast J.* The solar spectrum 2935 Ё to 8770 Ё. — Washington, 1966.—349 p.

Поступила в редакцию 26.11.99