

УДК 523.9-355+52-334.7

**И. Э. Васильева, Н. Г. Щукина**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 МСП, Киев ул. Академика Заболотного 27  
vasil@mao.kiev.ua, shchukin@mao.kiev.ua

### **Пары линий железа Fe I с разной магнитной чувствительностью**

*Приведен список пар линий нейтрального железа Fe I с разной магнитной чувствительностью, пригодных для измерения солнечных магнитных полей по методу отношения амплитуд параметра Стокса V. Отбор пар линий выполнен на основании данных монографии Гуртовенко и Костыка для диапазона длин волн  $\lambda = 303...996$  нм.*

*ПАРИ ЛІНІЙ ЗАЛІЗА Fe I ІЗ РІЗНОЮ МАГНІТНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ, Васильєва І. Е., Щукіна Н. Г. — Наведено список пар ліній нейтрального заліза Fe I із різною магнітною чутливістю, що можуть бути застосовані для вимірювання сонячних магнітних полів за методом відношення амплітуд параметра Стокса V. Відбір пар ліній був виконаний на основі даних монографії Гуртовенка і Костика для діапазону довжин хвиль  $\lambda = 303...996$  нм.*

*Fe I LINE PAIRS OF DIFFERENT MAGNETIC SENSITIVITY, by Vasilyeva I. E., Shchukina N. G. — We present a list of Fe I line pairs having different magnetic sensitivity which are suitable for the measurement of the solar magnetic fields using the Stokes V amplitude ratio. The list contains the spectral solar line data in the wavelength range  $\lambda = 303...996$  nm given by Gurtovenko and Kostik.*

Одним из распространенных на сегодня методов измерения магнитных полей на Солнце является так называемый метод отношения линий, предложенный в 1973 г. Стенфлю [12]. Суть метода, основанного на эффекте Зеемана, состоит в измерении отношения амплитуд параметра Стокса V двух линий с разными эффективными факторами Ланде, т. е. линий с разной чувствительностью к магнитному полю. Стенфлю рекомендовал для измерения солнечных магнитных полей

пару линий Fe I 524.7050 и 525.0208 нм. Физические условия образования этих линий одинаковы ввиду того, что они имеют практически одинаковые потенциалы возбуждения нижнего уровня  $EPL$  и значения  $lggf$ , где  $g$  — статистический вес нижнего уровня,  $f$  — сила осциллятора линии. При этом их эффективные факторы Ланде отличаются в 1.5 раза. В настоящее время наиболее часто для магнитографических измерений помимо этой пары используют еще две пары линий Fe I: 630.1501/630.2493 нм и 1564.8508/1565.2880 нм.

Исследования последних лет [6] показывают, что техника измерения магнитных полей, основанная на методе отношения линий, при использовании разных пар линий дает несовпадающие значения напряженности магнитного поля  $B$  и его потока. Поиску причин, ведущих к такому противоречию, было посвящено большое количество работ [2, 4—7, 11]. Согласно [4, 5, 7] главная причина расхождений между значениями магнитного поля, получаемыми при наблюдении одних и тех же солнечных структур с помощью разных пар линий, связана с высотой их образования. В частности, отношение амплитуд параметров Стокса  $V$  как для пары инфракрасных линий 1564.8508/1565.2880 нм, так и для пары линий в видимом диапазоне 524.7050/525.0208 нм хорошо коррелирует с напряженностью мелкомасштабного магнитного поля, так как высоты образования линий, относящихся к одной паре, близки. (Об условиях образования этих линий см. подробнее работы [1, 10]). Интересно, что с помощью пары линий 524.7050/525.0208 нм нельзя регистрировать килогауссовые внутрисеточные магнитные поля, поскольку в высоких фотосферных слоях, где формируются данные линии (на высотах  $H \approx 400$  км), такие поля просто отсутствуют.

Линии пары 630.1501/630.2493 нм образуются на разных высотах [1, 10]. В силу различий вертикальных градиентов поля  $B$  и горизонтальных флуктуаций температуры на этих высотах прямая зависимость между отношением  $V$ -амплитуд линий 630.1501 и 630.2493 нм и напряженностью поля  $B$  нарушается.

Таким образом, метод отношения линий дает надежные результаты при анализе солнечных магнитных полей только для двух пар линий: 1564.8508/1565.2880 нм и 524.7050/525.0208 нм. К оценкам, полученным с помощью линий 630.1501/630.2493 нм, следует относиться с большой осторожностью.

Цель нашей работы — поиск дополнительных пар линий нейтрального железа, пригодных для измерения солнечных магнитных полей. Ниже мы приводим результаты этого поиска.

**Результаты.** Мы выполнили отбор пар линий, используя данные монографии Э. А. Гуртовенко и Р. И. Костыка [1]. Напомним, что в данной работе содержатся сведения о потенциалах возбуждения  $EPL$ , силах осцилляторов  $lggf$  и высотах формирования  $H_d$  центров 1958 линий различных химических элементов, включая линии нейтрального железа, для диапазона длин волн  $\lambda = 303...996$  нм.

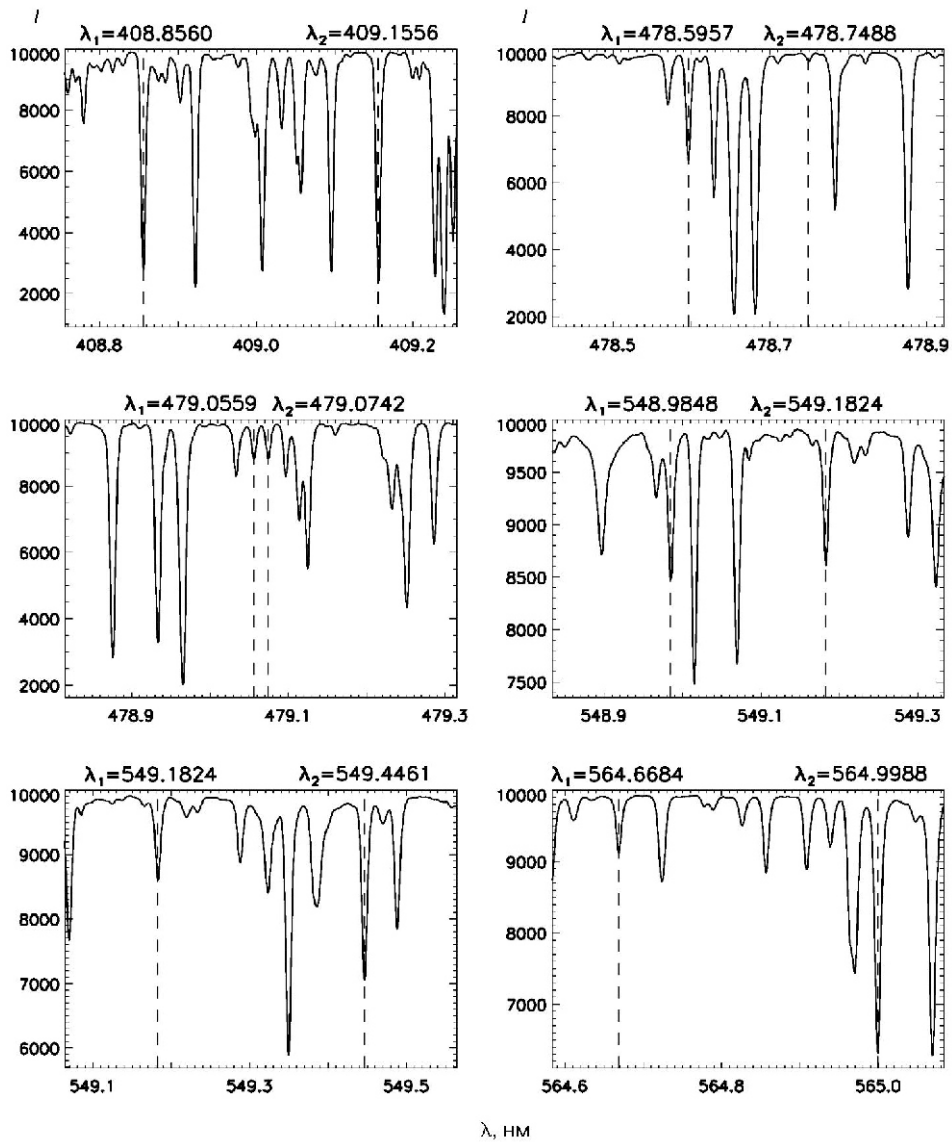
Основной критерий, которым мы руководствовались при выборе пар линий с разной магнитной чувствительностью, — одинаковая физика образования, что подразумевает их одинаковую чувствительность к давлению, температуре и полю скоростей атмосферы. В первую очередь это справедливо для линий одного мультиплета с близкими значениями потенциала возбуждения нижнего уровня *EPL*, образующихся в одном слое солнечной атмосферы. Помимо уже упомянутой пары линий 524.7050/525.0208 нм (мультиплета 1), нам удалось обнаружить лишь одну пару линий 585.8773/585.9230 нм (мультиплет 1084), которая удовлетворяет данному критерию (см. таблицу). Анализ образования линий железа в солнечной атмосфере, выполненный Н. Г. Щукиной и Трухильо Буэно [10], показывает, что есть три *EPL*-класса линий Fe I, каждый из которых характеризуется одинаковыми не ЛТР-механизмами формирования. Исходя из этого, мы смягчили критерий отбора, полагая, что линии Fe I со значениями *EPL*, отличающимися приблизительно на 1 эВ, имеют одну и ту же чувствительность к физическим параметрам атмосферы. При этом допускалось, что разница высот образования линий пары может достигать около  $H_d$  50 км (по данным [1]). Вторым критерием при отборе пары линий определялся возможностями современных ПЗС-камер. Для того чтобы вести одновременные наблюдения линий, принадлежащих одной паре, расстояние между ними не должно превышать 0.5 нм. Та-

**Пары линий Fe I, пригодные для измерения магнитных полей по методу отношения линий**

, нм	Номер мультиплета [9]	$H_d$	Переход	$g_l$	$g_u$	$\bar{g}$	<i>EPL</i> [1]
408.8560	906	260	$b^3D_2$ $^5D_1^o$	1.167	1.500	1.000	3.64
409.1556	357	307	$b^3P_2$ $^3D_1^o$	1.500	0.500	2.000	2.83
448.5973	825	154	$z^5P_2^o$ $f^5F_1$	1.833	0.000	2.750	3.65
448.6965	988	132	$z^3D_3^o$ $h^5D_2$	1.333	1.500	1.167	3.93
454.3223	893	134	$b^3D_2$ $t^5D_3^o$	1.167	1.500	1.833	3.64
454.6465	1047	127	$c^3F_2$ $w^1D_2^o$	0.667	1.000	0.833	4.19
478.5957	1044	160	$c^3F_3$ $^5D_4^o$	1.083	1.500	2.125	4.14
478.7488	408	147	$b^3G_3$ $x^3D_3^o$	0.750	1.333	1.042	3.02
479.0559	1068	133	$y^5D_3^o$ $f^5G_2$	1.500	0.333	2.667	4.15
479.0742	632	150	$a^3D_3$ $x^3F_3^o$	1.333	1.083	1.208	3.25
481.3719	1243	120	$d^3F_2$ $t^3F_2^o$	0.667	0.667	0.667	4.58
481.5223	720	150	$d^3P_1$ $x^3P_2^o$	1.000	1.500	1.750	3.41
499.2785	1110	134	$z^3P_1^o$ $g^5F_1$	1.500	0.000	0.750	4.26
499.5410	1113	140	$z^3P_1^o$ $f^5G_2$	1.500	0.333	-0.250	4.26
547.0086	1144	159	$z^5G_2^o$ $h^5D_1$	0.333	1.500	-0.250	4.44
547.3164	1064	153	$y^5D_2^o$ $e^5P_2$	1.500	1.833	1.667	4.19

Окончание таблицы

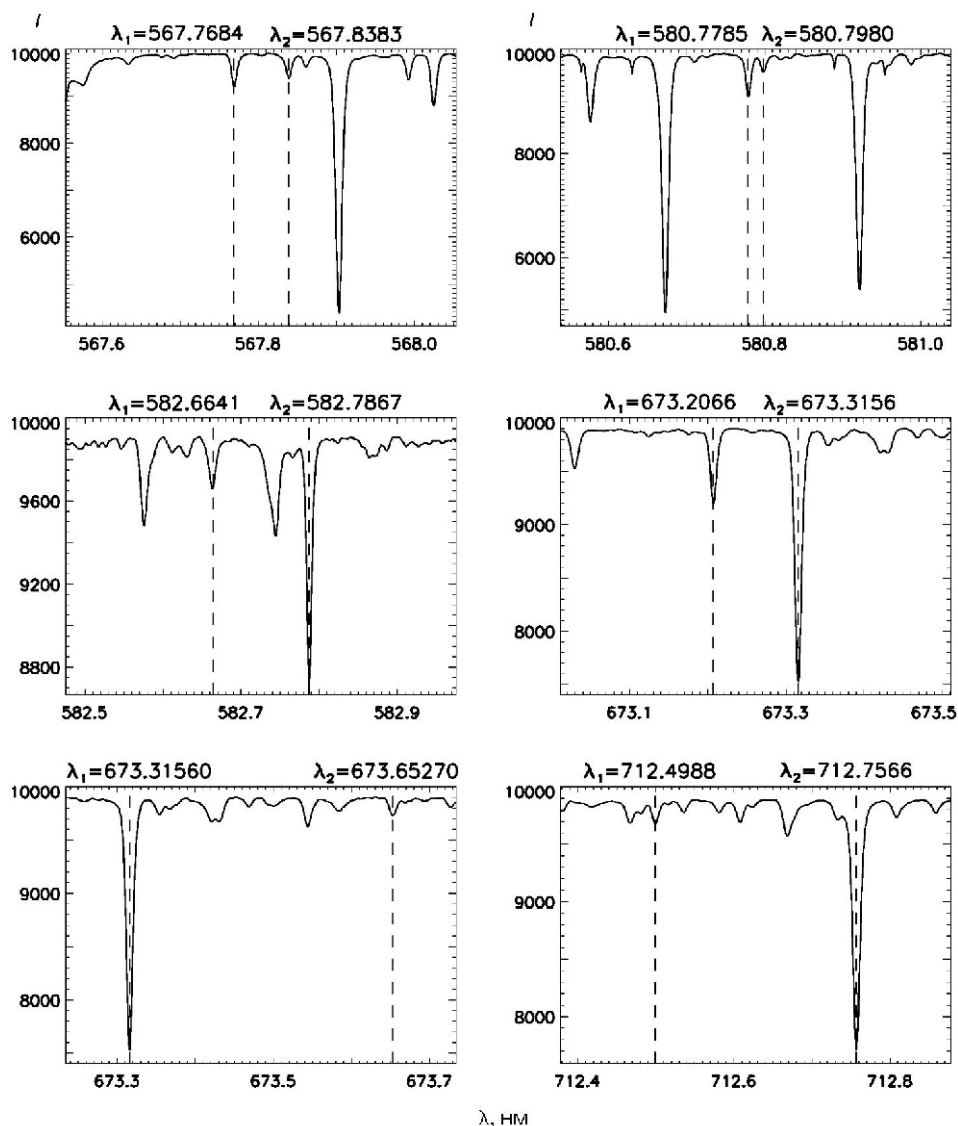
$\lambda$ , нм	Номер мультиплета [9]	$H_d$	Переход		$g_l$	$g_u$	$\bar{g}$	EPL [1]
548.9848	1148	141	$z^5G_2^o$	$f^3D_2$	0.333	1.167	0.750	4.44
549.1824	1031	144	$c^3F_2$	$u^3D_3^o$	0.667	1.333	2.000	4.19
549.1824	1031	144	$c^3F_2$	$u^3D_3^o$	0.667	1.333	2.000	4.19
549.4461	1024	168	$c^3F_4$	$x^3H_5^o$	1.250	1.033	0.600	4.07
549.6555	1281	129	$x^5D_4^o$	$i^5D_3$	1.500	1.500	1.500	4.91
549.9582	1159	128	$z^3G_3^o$	$g^5F_2$	0.750	1.000	0.500	4.47
561.9594	1161	176	$z^3G_5^o$	$f^5G_6$	1.200	1.333	1.667	4.39
562.4020	1160	223	$z^3G_5^o$	$h^5D_4$	1.200	1.500	0.600	4.39
564.6684	1109	138	$z^3P_1^o$	$e^5P_2$	1.500	1.833	2.000	4.26
564.9988	1314	172	$x^5F_1^o$	$g^5G_2$	0.000	0.333	0.500	5.10
565.1469	1161	150	$z^3G_3^o$	$f^5G_4$	0.750	1.150	1.750	4.47
565.2000	1059	132	$y^5D_1^o$	$f^5F_2$	1.500	1.000	0.750	4.22
567.7684	1057	140	$y^5D_4^o$	$e^5G_5$	1.500	1.267	0.800	4.10
567.8383	982	142	$z^3D_3^o$	$e^3F_2$	1.333	0.667	2.000	3.88
574.2961	1084	145	$y^5F_5^o$	$f^5F_5$	1.400	1.400	1.400	4.18
574.7957	1182	168	$y^3F_3^o$	$e^3H_4$	1.083	0.800	0.375	4.61
580.7785	552	158	$z^5D_0^o$	$e^7D_1$	—	3.000	3.000	3.29
580.7980	1178	128	$y^3F_3^o$	$f^5G_2$	1.083	0.333	1.833	4.61
582.6641	1084	134	$y^5F_2^o$	$f^5F_2$	1.000	1.000	1.000	4.26
582.7867	552	163	$z^5D_1^o$	$e^7D_2$	1.500	2.000	2.250	3.28
609.4371	1177	151	$y^3F_2^o$	$f^5P_1$	0.667	2.500	-0.250	4.65
609.6664	959	198	$z^3F_2^o$	$e^3F_3$	0.667	1.083	1.500	3.98
673.2066	1225	141	$d^3F_3$	$u^3G_3^o$	1.083	0.750	0.917	4.58
673.3156	1195	169	$y^5P_1^o$	$g^5D_0$	2.500	—	2.500	4.64
673.3156	1195	169	$y^5P_1^o$	$g^5D_0$	2.500	—	2.500	4.64
673.6527	1122	139	$b^1D_2$	$z^1D_2^o$	1.000	1.000	1.000	4.29
686.2496	1191	178	$y^5P_3^o$	$e^7G_4$	1.667	1.300	0.750	4.56
686.4312	1186	140	$y^5P_3^o$	$e^7F_2$	1.667	1.500	1.833	4.56
697.0469	463	168	$o^3P_2$	$y^3D_2^o$	1.500	1.167	1.333	3.02
697.1937	404	177	$b^3G_3$	$y^3D_2^o$	0.750	1.167	0.333	3.02
697.1937	404	177	$b^3G_3$	$y^3D_2^o$	0.750	1.167	0.333	3.02
697.6926	1221	155	$d^3F_3$	$v^3F_4^o$	1.083	1.250	1.500	4.58
700.7969	1078	180	$y^5F_5^o$	$e^3F_4$	1.400	1.250	1.700	4.18
701.0352	1221	149	$d^3F_2$	$^3F_2^o$	0.667	0.667	0.667	4.58
707.9348	1278	134	$x^5D_4^o$	$f^3D_3$	1.500	1.333	1.750	4.91
708.3395	1277	158	$x^5D_4^o$	$e^3G_5$	1.500	1.200	0.600	4.91
712.4988	815	152	$z^5P_1^o$	$e^7D_1$	2.500	3.000	2.750	3.69
712.7566	1273	164	$x^5D_2^o$	$g^5F_2$	1.500	1.000	1.250	4.99
774.5516	1305	156	$x^5F_2^o$	$f^5P_1$	1.000	2.500	0.250	5.08
774.6594	1309	152	$x^5F_3^o$	$f^3D_3$	1.250	1.333	1.292	5.06



Профили линий Fe I из Льежского атласа солнечного спектра [3] (спектральный интервал = 408...565 нм). Пары линий с разной магнитной чувствительностью (см. таблицу) отмечены вертикальными штриховыми линиями

ким образом было отобрано 215 пар, в каждой из которых линии Fe I имеют близкие значения  $EPL$ ,  $H_d$  и  $\bar{g}$ .

При оценке магнитного поля по методу отношения линий необходимо, чтобы эффективные факторы Ланде  $\bar{g}$  линий пары были различными. Поэтому в дальнейшем рассмотрение мы включили только те пары линий, у которых эффективные факторы Ланде отличаются более чем на 1. Эффективный фактор Ланде  $\bar{g}$  спектральной линии, характеризу-



Окончание рисунка (спектральный интервал = 567...713 nm)

ющий ее чувствительность к магнитному полю, вычислялся по формуле

$$\bar{g} = \frac{1}{2}(g_u - g_l) + \frac{1}{4}(g_u + g_l)(J_u - J_l)(J_u + J_l + 1), \quad (1)$$

где  $g_u, g_l$  и  $J_u, J_l$  — факторы Ланде и квантовые числа полных моментов для верхнего ( $u$ ) и нижнего ( $l$ ) энергетических уровней, при переходе между которыми образуется линия. Факторы Ланде уровней  $g_u$  и

$g_l$  рассчитывались в приближении  $LS$ -связи [8]:

$$g_l = 1 + \frac{J(J-1) S(S-1) L(L-1)}{2J(J-1)},$$

где  $S$  — квантовое число полного спинового момента,  $L$  — квантовое число полного орбитального момента,  $J$  — квантовое число полного момента количества движения рассматриваемого уровня.

Отобранные пары неблендированных линий Fe I, пригодные для измерения магнитных полей по методу отношения линий, представлены в таблице. Она содержит длину волны линии, номер мультиплета, высоту образования центра линии  $H_c$ , электронную конфигурацию перехода, факторы Ланде для верхнего  $g_u$  и нижнего уровней  $g_l$ , эффективный фактор Ланде  $\bar{g}$  и потенциал возбуждения нижнего уровня  $EPL$ . Общее число пар линий — 28. Приведенная информация получена на основе базы данных NIST ([http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)) и атласа Мур [9]. На рисунке мы показываем профили для пар линий, одна из которых имеет повышенную магнитную чувствительность (эффективный фактор Ланде  $\bar{g} > 2$ ).

Результаты, представленные в таблице и на рисунке, свидетельствуют о том, что в оптическом диапазоне солнечного спектра есть более двух десятков пар линий Fe I с разной магнитной чувствительностью, которые можно использовать для измерения магнитных полей с помощью метода отношения линий. Все пары линий, за исключением пары 408.8560/409.1556 нм, образуются в слое между 100 и 200 км. Таким образом, данные пары линий несут информацию о магнитном поле в нижней части фотосферы. Пара линий 408.8560/409.1556 нм может быть использована для измерения полей в средней фотосфере, а именно на высотах около 300 км. Принимая во внимание, что области формирования многих пар линий перекрываются, появляется возможность дополнительного контроля надежности полученных значений напряженности  $B$ . Все линии являются сравнительно слабыми, что в данном случае является преимуществом, поскольку информация о магнитном поле исходит из достаточно узкого слоя.

Мы надеемся, что представленный в нашей работе список линий окажется полезным для многочисленных исследователей солнечного магнетизма.

1. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—200 с.
2. Bellot Rubio L. R., Collados M. Understanding internetwork magnetic fields as determined from visible and infrared spectral lines // *Astron. and Astrophys.*— 2003.—**406**.—P. 357—362.
3. Delbouille L., Neven L., Roland G. Photometric atlas of the solar spectrum from 3000 Å a 10000 Å. — Liege: Institut d'Astrophysique de Universite de Liege, 1973.
4. Khomenko E., Collados M. Magnetic field inversions from Stokes profiles generated by MHD simulations // *Memorie della Societa Astronomica Italiana.*—2006.—**78**.— P. 166—171.

5. *Khomenko E., Collados M.* On the Stokes  $V$  amplitude ratio as an indicator of the field strength in the solar internetwork // *Astrophys. J.*—2007.—**659**, N 2.—P. 1726—1735.
6. *Khomenko E. V., Kostik R. I.* Studying the magnetism of the quiet Sun: Diagnostic techniques and results // *J. Phys. Studies.*—2006.—**10**, N 4.—P. 381—391.
7. *Khomenko E. V., Shelyag S., Solanki S. K., Vogler A.* Stokes diagnostics of simulations of magnetoconvection of mixed-polarity quiet-Sun regions // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**442**.—P. 1059—1078.
8. *Landi Degl'Innocenti E.* On the effective Lande factor of magnetic lines // *Solar Phys.*—1982.—**77**.—P. 285—289.
9. *Moore C. E.* A Multiplet table of astrophysical interest: Revised edition. — NSRDS-NBS 40.—1972.—261 p.
10. *Shchukina N. G., Trujillo Bueno J.* The iron line formation problem in three-dimensional hydrodynamical models of solar-like photospheres // *Astrophys. J.*—2001.—**550**.—P. 950—970.
11. *Socas-Navarro H., Borrero J., Asensio Ramos A., et al.* Multiline spectropolarimetry of the quiet Sun at 5250 and 6302 // *Astrophys. J.*—2008.—**674**.—P. 596—606.
12. *Stenflo J. O.* Magnetic-field structure of the photospheric network // *Solar Phys.*—1973.—**32**.—P. 41—63.
13. *Stenflo J. O., Harvey J. W., Brault J. W., Solanki S.* Diagnostics of solar magnetic fluxtubes using a Fourier transform spectrometer // *Astron. and Astrophys.*—1984.—**131**.—P. 333—346.
14. *Stenflo J. O., Pantellini F. G. E., Solanki S.* Lines in the wavelength range 14300—6700 Å with large Stokes  $V$  amplitudes outside sunspots // *Solar Phys.*—1986.—**107**.—P. 57—61.

Поступила в редакцию 25.12.08