

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.02.050>

УДК 523.9

**С. Н. Осипов, И. Э. Васильева**

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03143, Киев, ул. Заболотного 27, Киев, Украина  
osipov@mao.kiev.ua  
vasileva@mao.kiev.ua

### **Фраунгоферовы линии при переходе от центра к краю солнечного диска**

*На телескопе АЦУ-5 ГАО НАН Украины после замены штатного главного зеркала на короткофокусное (с фокусным расстоянием 1 м), зарегистрированы двухмерные спектры Солнца (от центра к краю диска) в участках  $\lambda = 532.0...532.8$  и  $539.1...539.9$  нм. Достоинством примененного метода является одновременность регистрации спектра для разных гелиоцентрических позиций на солнечном диске. Выполнены редукции наблюдательных данных за влияние рассеянного света в спектрографе, атмосферного рассеянного света, инструментального контура спектрографа и некоторых aberrаций. Отношения спектров центр/край сопоставлены с данными литературных источников. Для 11 спектральных линий получены данные об изменении их профилей при переходе от центра к краю солнечного диска. Выявленная немонотонность таких изменений объяснена неоднородностями физических условий на поверхности Солнца. В целом глубины исследуемых линий Fe I демонстрируют тенденцию уменьшения силы линий при переходе к лимбу. Полуширины большинства линий увеличиваются к краю диска. Эквивалентные ширины показывают разнонаправленное изменение. Поведение параметров линии Mn I 539.4 нм другое: все три исследуемых параметра увеличиваются к краю диска, хотя у самого лимба глубина и эквивалентная ширина также начинают уменьшаться. Измерен лимб-эффект линий, который показывает наибольшее значение при сравнении положений ядер слабых линий. Сильные линии демонстрируют максимальный лимб-эффект при сравнении средней части бисекторов линий.*

**Ключевые слова:** Солнце, фотосфера, спектральные линии, потемнение к краю, бисектор, лимб-эффект.

Данные о потемнении к краю солнечного диска важны для решения ряда прикладных задач и имеют фундаментальный характер при построении эмпирических моделей солнечной атмосферы.

© С. Н. ОСИПОВ, И. Э. ВАСИЛЬЕВА, 2019

Излучение от краевых зон диска Солнца, по сравнению с центром диска, формируется в более высоких слоях солнечной атмосферы, имеющих другие физические условия. На краю диска наблюдаемый спектр изменяется еще и вследствие того, что наблюдаемые доплеровские сдвиги и уширения спектральных линий обусловлены не радиальной, а тангенциальной составляющей фотосферных скоростей.

Потемнение к краю Солнца в континууме хорошо исследовано [5, 27] и неплохо согласуется с модельными расчетами в рамках различных моделей солнечной атмосферы. Данные о потемнении к краю в спектральных полосах (континуум + линии) [6] для возможности их воспроизведения по каким-либо моделям требуют информации о поведении линий вдоль радиуса диска Солнца. Но изменение спектральных линий при переходе центр — край исследовано слабо и фрагментарно. Целый ряд работ [2, 18, 26, 31] указывает на то, что изменения профилей спектральных линий вдоль радиуса Солнца плохо воспроизводятся теоретическими расчетами. Отмечается [31], что ни одна модель одномерной атмосферы не может полностью обеспечить хорошее представление фактической солнечной атмосферы.

При измерениях CLV (center-limb-variations) в континууме наилучшую точность обеспечивает метод сканирования изображения Солнца по щели спектрографа при выключенном часовом ведении телескопа. А вот для изучения поведения профилей линий при переходе центр — край, как правило, применяется другой подход — проводятся последовательные наблюдения выбранного участка спектра в разных местах солнечного диска.

В известной монографии [1] сделан анализ текущих исследований солнечных линий при переходе к краю диска. В последующие годы такие исследования продолжались [9, 10, 19, 21, 23, 28].

Для ряда задач крайне важно сравнивать профили линий в центре и у края диска привязанные к одной и той же шкале длин волн. С этой целью при наблюдениях часто производят параллельные записи лабораторных источников или используют теллурические линии [11].

Среди множества публикаций, посвященных CLV-исследованиям, необходимо выделить две работы:

1. В 1970-е годы на фурье-спектрометре (FTS) телескопа McMath-Pierce (Китт-Пик) были проведены наблюдения спектра Солнца [13, 14]. Созданный на их основе атлас центра диска Солнца [25] охватывает большой диапазон длин волн  $\lambda = 329.0...1250.8$  нм и, учитывая очень высокое спектральное разрешение (больше 500 000), широко используется в качестве спектрального стандарта солнечного спектра. Соответствующий атлас лимба ( $\lambda = 408.4...995.0$  нм,  $\mu = \cos \theta = 0.145$ , где  $\theta$  — гелиоцентрический угол) составлен [29] по данным наблюдений, проведенных в октябре 1978 г. и в апреле 1979 г. на том же приборе [30]. Поле зрения было ограничено прямоугольником  $17.5 \times 10$  внутри солнечного лимба вблизи одного из гелиографических полюсов. Ошибка  $\Delta \lambda$ , оцененная авторами, составляет около 0.01.

2. В работе [17] представлен атлас центра солнечного диска и солнечного лимба вблизи одного из полюсов ( $\mu = 0.3$ ). Наблюдения проводились в июне (центр диска) и ноябре (лимб) 2013 г. на сидеростате университета Табриз при отсутствии в области щели пятен и активных областей. Входная апертура ограничивалась высотой входной щели, равной  $75 \mu$ , которая была ориентирована параллельно лимбу Солнца. Разрешение спектра было умеренным (около 70000), а отношение сигнал/шум — 400...600. Атлас охватывает диапазон длин волн  $\lambda = 398.0...710.0$  нм.

К сожалению, атласы [17, 29] не позволяют детально изучить изменения линий при переходе от центра к краю солнечного диска. Ценность этих работ в том, что они дают возможность сопоставить огромное количество спектральных линий в центре и на краю диска Солнца, откалибровать наблюдения, изучить тенденции изменения к краю для групп линий и т. д. Отношение спектров, полученных в центре и вблизи края диска, имеет сложную и богатую структуру и, согласно [29], достойно быть названным третьим солнечным спектром.

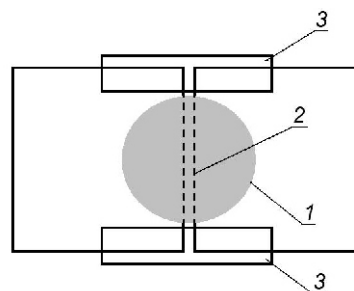
Очевидно, что надежные данные об изменениях линий вдоль радиуса солнечного диска могут быть получены при сочетании высокого спектрального разрешения (не менее 150 000...200 000) и хорошего разрешения при позиционировании щели спектрографа на диске (особенно на лимбе). К сожалению, таких наблюдений даже для избранных линий до сих пор никем не получено.

В представленной работе предлагается метод наблюдений, который позволяет совместить высокое спектральное разрешение с достаточным пространственным разрешением и детально изучить изменения фраунгоферовых линий при переходе от центра к краю солнечного диска.

**Наблюдения и редукции.** На телескопе АЦУ-5 ГАО НАН Украины 15 сентября 2015 г. проведены серии измерений потемнения к краю солнечного диска в избранных спектральных участках  $\lambda = 532.0...532.8$  и  $539.1...539.9$  нм. Взаимное расположение зеркал целостата было таковым, что щель спектрографа была наклонена под углом  $26.5^\circ$  к линии север — юг, соединяющей полюса Солнца.

Спектрограф телескопа использовался в классическом автоколлимационном режиме однократного прохождения света через дифракционную решетку ( $140 \times 150$  мм, 600 штр/мм). Наблюдения проводились в четвертом порядке дифракции, перекрывающиеся порядки отсекались светофильтрами, расположенными перед входной щелью. Спектры регистрировались ПЗЗ-камерой SBIG ST-8300M (3326 пкл,  $17.96 \times 13.52$  мм). Вместо штатного главного зеркала телескопа использовалось сферическое зеркало диаметром 5 см и фокусным расстоянием 100 см. Изображение Солнца размером около 10 мм было меньшим, чем высота входной щели спектрографа (11 мм), что позволило получить спектры одновременно от всего фотометрического разреза лимб — центр — лимб (рис. 1).

Рис. 1. Ориентация изображения Солнца и положения входной щели спектрографа (1 — изображение Солнца, 2 — входная щель, 3 — ограничительные диафрагмы)



Спектрограф телескопа является спектрографом закрытого типа и имеет хорошую термостабилизацию. Прямые измерения дрожания спектра показали, что при используемых экспозициях (около 2 с) внутренние паразитные лучевые скорости не превышают 5 м/с.

Несмотря на применение системы защитных экранов и диафрагм влияние рассеянного света в спектрографе было значительным (~1.5 %) вследствие того, что для ограничения перекрывающихся порядков спектра использовались широкополосные светофильтры. Исследование величины рассеянного света в спектрографе проводилось с помощью дополнительных измерений при использовании специальных диафрагм на входной щели спектрографа. Анализ изменений уровней сигнала за пределами спектра позволил разделить спектральный и белый компоненты рассеянного света. Оказалось, что профиль белого компонента на кадре приемника сильно изменяется в направлении, перпендикулярном к дисперсии, и хорошо аппроксимируется квадратичной функцией.

При обработке наблюдений необходимо учитывать влияние атмосферного рассеянного света. Для осуществления таких коррекций проводились дополнительные измерения при сдвинутых вертикально изображениях Солнца, что позволило зарегистрировать излучение от неба на расстояниях до одного солнечного радиуса за краем диска. Величина измеренного атмосферного рассеянного света оказалась на 10...12 % большей, чем при наблюдениях со штатным главным зеркалом телескопа. Распределение яркости измеренного солнечного ореола описывалось сверткой двумерного профиля поверхности Солнца с функцией рассеянного света, которая представлялась в виде суммы двух дисперсионных кривых. Полученное аналитическое решение использовалось для расчета яркости света, рассеянного атмосферой, в любой точке солнечного диска.

Измерения инструментального контура (ИК) на телескопе АЦУ-5 проводится регулярно с помощью специального устройства, оснащенного газовым He-Ne-лазером ЛГН-302 на волне  $\lambda = 632.8$  нм [7]. Профиль ИК подвергался перерасчету в связи с необходимостью учесть отличия ИК для когерентного и некогерентного освещения, а также изменения профиля с длиной волны. В ядрах некоторых узких и глубоких фраунгоферовых линий величина редуций за влияние ИК достигала 0.035...0.04.

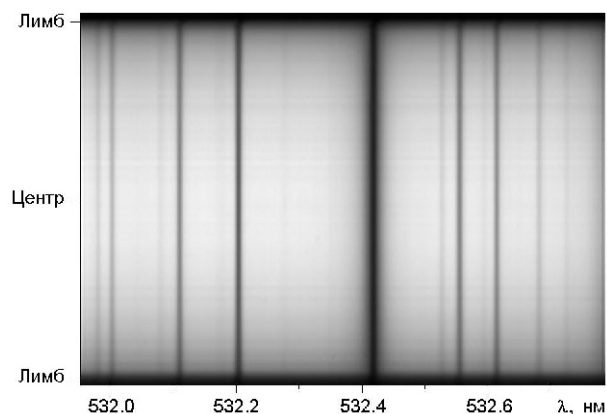


Рис. 2. Двухмерный спектр Солнца для  $532.0...532.8$  нм

Еще одним весомым фактором дополнительных редуций является необходимость учета aberrаций внеосевых лучей. В спектрографе АСП-20 такие aberrации (в первую очередь кома) приводят к асимметричному замыванию профиля потемнения к краю. Исследования показали, что такое замывание неплохо описывается асимметричной кривой, смоделированной в виде суммы двух полуГауссиан с полуширинами 4 и 14 пкл. Малый размер изображения Солнца в нашем методе означает, что эти параметры соответствуют 3.8 и 13.5 . Профиль потемнения к краю исправлялся за такое замывание. Точное положение лимба определялось как место максимального изменения интенсивности для длин волн непрерывного спектра. Асимметричное замывание, наличие наклона и кривизны спектральных линий приводит также к небольшим фиолетовым сдвигам спектров лимбовых зон Солнца. Мы провели численное моделирование этого эффекта для обоих лимбов и ввели соответствующие поправки в полученные результаты.

В итоге мы получили профили фраунгоферовых линий с высоким спектральным разрешением ( $\sim 300\,000$ ) измеренные одновременно вдоль всего радиуса солнечного диска (т. н. двухмерный спектр). На рис. 2 показан такой спектр для диапазона  $\lambda = 532.0...532.8$  нм. Формальное пространственное разрешение, определяемое междупиксельными размерами, было около 1.01 . Для уменьшения шумов спектры сглаживались вдоль радиуса Солнца и бинировались по трем спектральным дорожкам. Таким образом, разрешение приводилось в соответствие к реальному качеству неба ( $\sim 3$  ).

Каких-либо существенных отличий в поведении линий для северного и южного полушарий нами не обнаружено. Поэтому ниже для уменьшения случайных ошибок все результаты приводятся для усредненных данных центр — край по обоим полушариям.

**Результаты.** На рис. 3 показаны полученные спектры в центре диска и на лимбе, а также отношение лимб/центр для позиций на диске

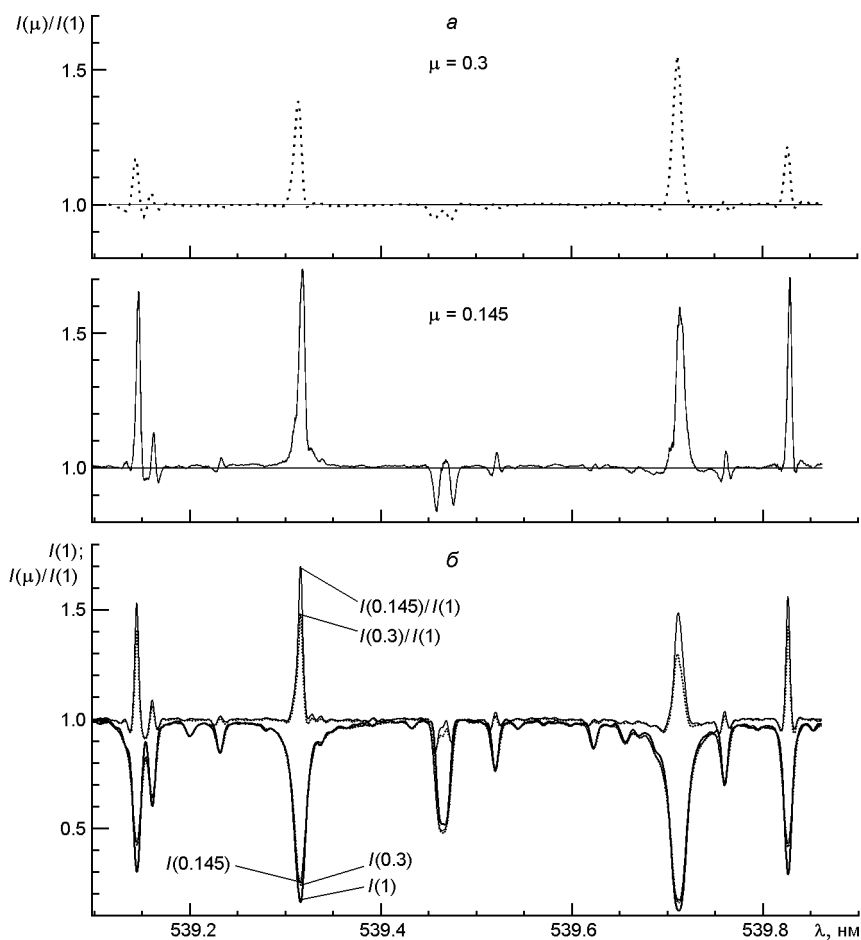


Рис. 3. Спектры Солнца в области  $\lambda = 539.1 \dots 539.9$  нм: *a* — отношение спектров лимб/центр по данным [17] ( $\mu = 0.3$ ) и по данным [29] ( $\mu = 0.145$ ); *б* — спектры Солнца по данным АЦУ-5 в центре ( $\mu = 1$ ) и на краю диска ( $\mu = 0.3$  и  $0.145$ ), а также соответствующие отношения лимб/центр

Солнца  $\mu = 0.145$  и  $\mu = 0.3$ . При построении рисунка спектры на лимбе несколько смещались в фиолетовую сторону для наилучшего совмещения с данными в центре диска. Такая процедура позволила нам сравнить отношение спектров лимб/центр с соответствующими данными работ [17, 29]. В целом наши данные хорошо согласуются с данными [29]. Расхождение полученных результатов во многом вызвано различием спектрального разрешения используемых инструментов и различием апертур при наблюдениях на лимбе. Кроме того, наблюдаемые отличия могут быть обусловлены и фактом неодновременности регистрации спектров в центре и на лимбе Солнца в работах [17, 29].

Для дальнейшего анализа мы выбрали 11 линий. В таблице для каждой выбранной спектральной линии указаны: длина волны по данным [24], химический элемент, потенциал  $EPL$  возбуждения нижнего уровня [22], высота  $H_D$  формирования ядра линии [3], сила осцилля-

## Параметры выбранных спектральных линий

Условный номер линии	$\lambda$ , нм	Элемент	$EPL$ , эВ	$H_D$ , км	$\lg gf_D$	$\langle g_L \rangle$
20	532.0048	Fe I	3.64	163	-2.59	1.326
21	532.1106	Fe I	4.43	193	-1.35	1.100
22	532.2049	Fe I	2.28	320	-2.89	1.506
24	532.4185	Fe I	3.21	500 [20]	-0.1 [20]	1.502
25	532.5559	Fe II	3.22	183	-3.42	0.98
26	532.6154	Fe I	3.02 [24]	?	-3.13 [33]	0.761
		Fe I	3.57	?	-2.61 [33]	1.000
93	539.3174	Fe I	3.24	?	-0.60 [33]	1.500
94	539.4674	Mn I	0.00	280	-3.57	2.001
95	539.525	Fe I	4.45	151	-1.81	0.335
97	539.7131	Fe I	0.91	?	-2.14 [33]	1.350
98	539.8285	Fe I	4.45	315	-0.63	0.335

тора  $gf$  [3] и фактор Ланде  $g_L$  (по данным [22] либо рассчитанный нами в LS-приближении). Другие источники данных указаны в ячейках таблицы. Указаны также условные номера линий, составленные из цифр третьего и четвертого разряда в записи длины волны спектральной линии (20 — 532.00 нм, 21 — 532.11 нм и т. д.). Среди выбранных линий преобладают линии нейтрального железа.

Для изучения выбранных спектральных линий необходимо провести уровень континуума для каждой линии. В верхней части рис. 4 тонкими вертикальными линиями указаны участки, вокруг которых искались максимумы интенсивности, которые принимались за локальные континуумы слева (L) и справа (R) от линии. Выбор этих участков не всегда был однозначным. Важным критерием при таком выборе была устойчивость положений L и R при переходе от спектров центра Солнца к спектрам окололиimbusовых участков. На рис. 4 для спектра центра диска штриховыми отрезками показаны уровни локальных континуумов, к которым и нормировались измеренные профили линий. Блендирование в крыльях линий убиралось с помощью последовательности огибающих прямых.

Глубина линий определялась как  $d = 1 - I_R$ , где  $I_R$  — остаточная интенсивность. На рис. 5 приводятся данные изменений глубин  $d$ , полуширин  $FWHM$  и эквивалентных ширин  $EW$  выбранных линий вдоль радиуса Солнца. Наблюдаются характерные немонотонные возмущения этих параметров вследствие неоднородности поверхности Солнца.

Для доказательства именно солнечного, а не инструментального происхождения этих неоднородностей, мы проанализировали изображения Солнца, полученные на спутнике SDO\* во время проведения наблюдений на АЦУ-5.

\* <https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/img/browse/2015/09/15/>

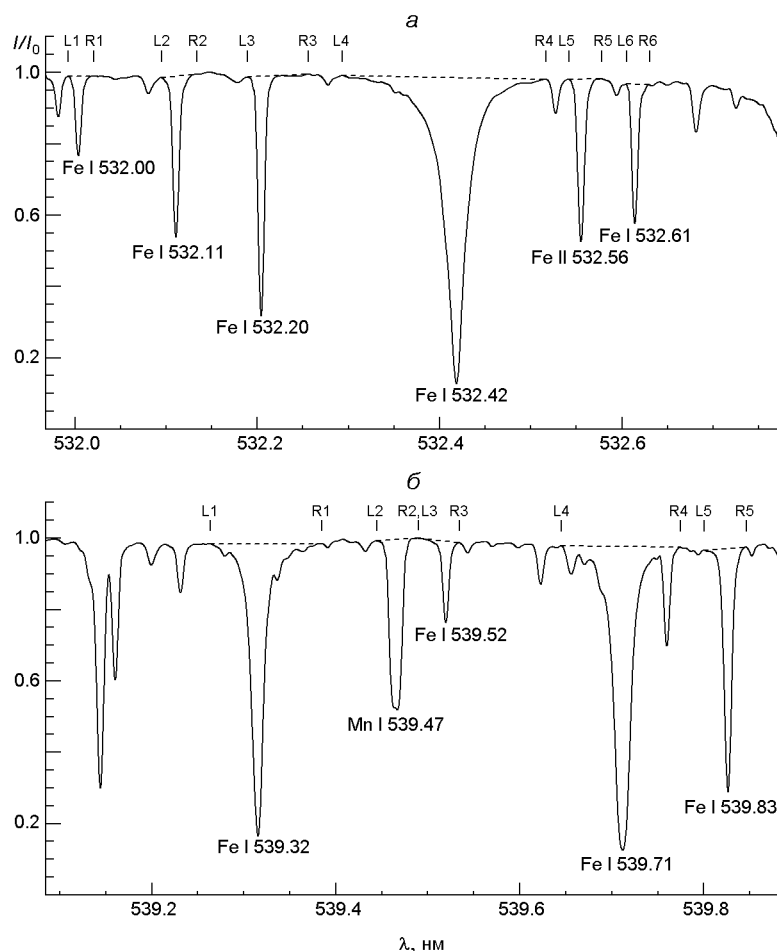


Рис. 4. Спектр центра диска Солнца: *a* — область  $\lambda = 532.0...532.8$  нм, *б* — область  $\lambda = 539.1...539.9$  нм. Вертикальные штрихи сверху — места локального континуума (L, R — слева и справа от линии)

Измерения на спутнике ведутся в нескольких каналах. Для анализа мы выбрали изображения Солнца в канале «1700Å», отображающие состояние Солнца на высотах области температурного минимума и в фотосфере.

Несмотря на то что в белом свете никакой активности в области щели не наблюдалось, на изображениях в канале «1700Å» заметны небольшие области активности (рис. 6а), затрагивающие, в частности, и полосу, соответствующую положению щели спектрографа телескопа АЦУ-5.

Для момента времени, максимально близкого ко времени наших наблюдений, мы сравнили ход интенсивности по спутниковым изображениям вдоль линии на Солнце, соответствующей положению щели спектрографа АЦУ-5, и аналогичный ход остаточной интенсивности, полученной для анализируемых нами линий. Чтобы исключить влияние эффекта потемнения к краю, мы аппроксимировали кривые потемнения к краю полиномами и определили возмущения интенсив-



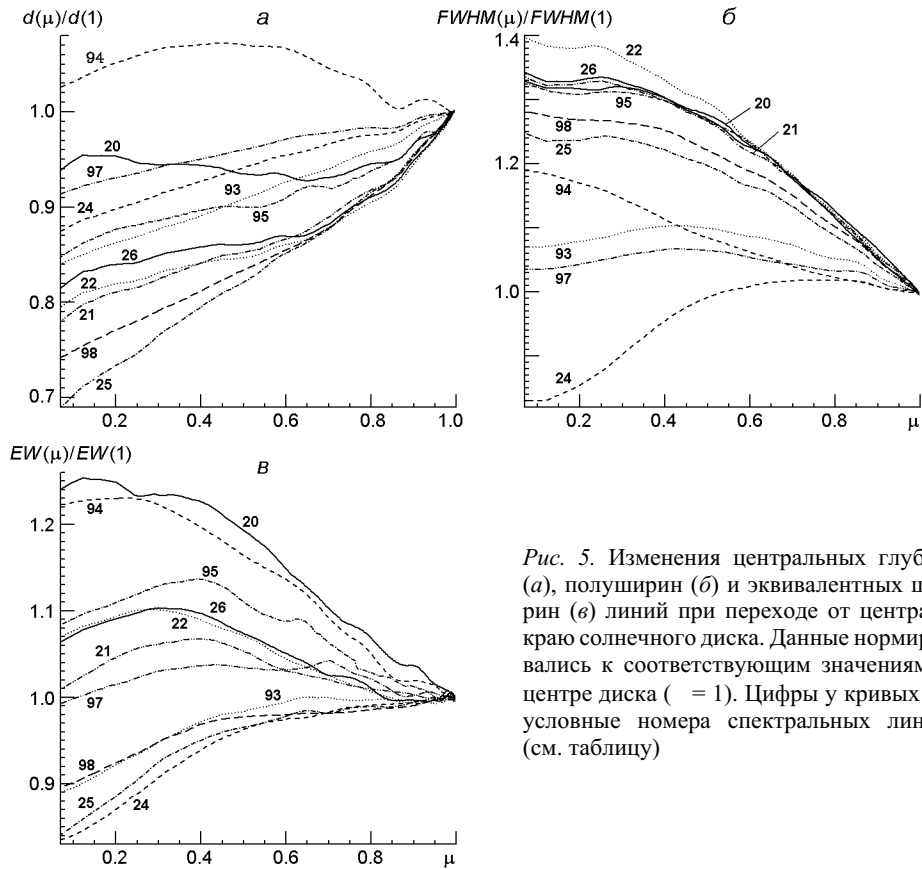


Рис. 5. Изменения центральных глубин (а), полуширин (б) и эквивалентных ширин (в) линий при переходе от центра к краю солнечного диска. Данные нормировались к соответствующим значениям в центре диска ( $\mu = 1$ ). Цифры у кривых — условные номера спектральных линий (см. таблицу)

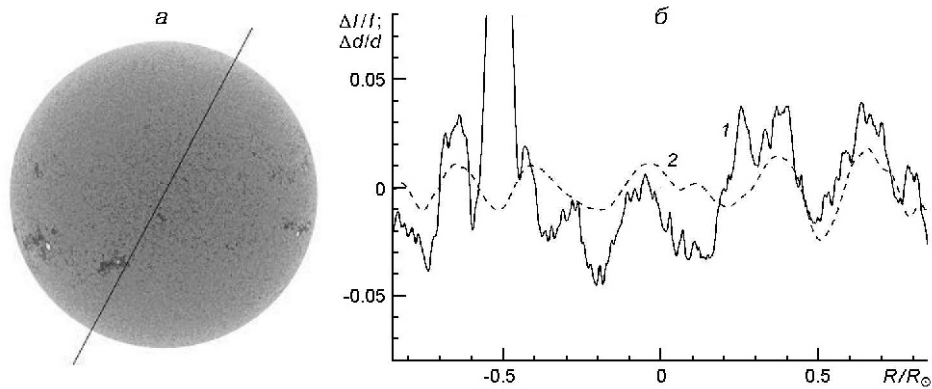


Рис. 6. Вариации яркости вдоль поверхности Солнца: а — изображение Солнца в фильтре «1700Å» (SDO) для момента  $12^h 17^m 42^s$  15.09.2015 г. (прямая линия — положение щели спектрографа); б — изменения  $I/I$  яркости вдоль выбранного направления щели (изображение «1700Å», кривая 1) и изменения  $d/d$  глубины линии Fe I 532.11 нм (АЦУ-5, кривая 2). Потемнение к краю исключено

ности как разность между исходными и аппроксимированными значениями (рис. 6б). Для данных о ходе глубин линии  $\lambda = 532.11$  нм, наблюдаемой нами, была проведена аналогичная аппроксимация и получены соответствующие возмущения для параметров  $d$ .

На рис. 6б видно, что возмущения кривых полученных по данным SDO и АЦУ-5 хорошо коррелируют между собой, за исключением области  $-0.5R$ , где в щель спектрографа попала активная область. Такая хорошая корреляция доказывает солнечную природу наблюдаемых возмущений линий вдоль радиуса солнечного диска и подразумевает некоторую осторожность при окончательных выводах, так как для другого момента времени результаты наблюдений могут быть другими. Тем не менее, мы можем судить об общих тенденциях поведения линий вдоль радиуса Солнца.

Глубины почти всех исследуемых линий демонстрируют тенденцию уменьшения силы линий при переходе к лимбу. Полуширины большинства линий увеличиваются к краю диска из-за растущего вклада поля горизонтальных скоростей в нетепловое уширение линий. Три наиболее сильные линии, Fe I 532.4, 539.3, 539.7 нм, формирующиеся на больших высотах в атмосфере, не показывают этого эффекта. Более того, линия Fe I 532.4 нм сужается к лимбу. Эквивалентные ширины показывают разнонаправленное изменение при переходе к лимбу. Изменения параметров линии Mn I 539.4 нм выбиваются из общего ряда: все три исследуемых параметра увеличиваются к краю диска, хотя на самом лимбе (при  $\mu > 0.3$ )  $d$  и  $EW$  также начинают уменьшаться.

Полученные наблюдательные данные дают уникальную возможность выполнить с высокой точностью абсолютную привязку спектров на лимбе и в центре диска Солнца. Это позволяет изучить не только форму бисекторов отдельных линий, но и их абсолютные сдвиги для разных положений  $\mu$ , т. е. измерить двухмерный лимб-эффект. Для этого мы предварительно рассчитали инструментальную кривизну наблюдаемого спектра (согласно [4]) и ввели соответствующие смещения спектров, полученных для разных участков входной щели, т. е. для разных  $\mu$ .

Изменения формы бисекторов линий и их относительные сдвиги для разных  $\mu$  можно увидеть на рис. 7. Интерпретировать такие данные непросто — помимо необходимости учета изменения поля скоростей с высотой и зависимости силы линии от температуры и давления, следует помнить о зависимости асимметрии линий от сил осцилляторов, потенциала возбуждения, уровня ионизации и даже от длины волны линии [16]. Видно, что С-образный бисектор сильных линий Fe I 532.4 и 539.3 нм при переходе к лимбу постепенно изменяет свой изгиб на противоположный. Лимб-эффект имеет фиолетовый прогиб в области  $\mu = 0.5...0.6$  для тех частей бисекторов, которые формируются в глубоких слоях атмосферы. Причиной этому, как объяснено в работе [12], есть вклад горизонтальных скоростей над расширяющимися гранулами. При переходе к лимбу наблюдаются более высокие слои солнечной атмосферы, где над гранулами происходит инверсия прозрачности. Здесь доплеровские смещения опреде-

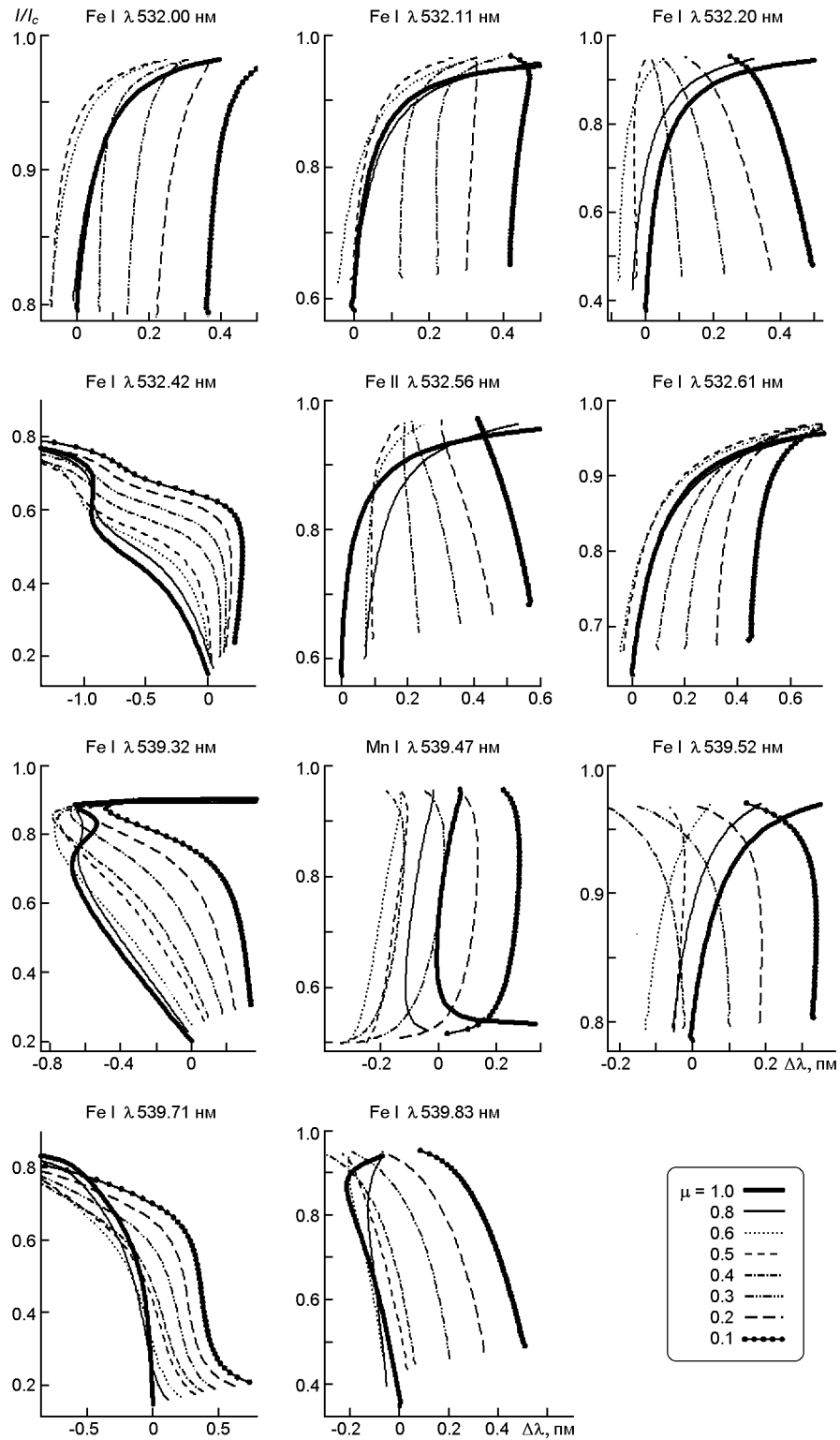


Рис. 7. Бисекторы линий для разных положений на диске Солнца. Нуль-пункт положения бисектора на шкале определялся по измерениям в центре диска Солнца и соответствовал положениям ядер линий (для линий железа) или положению середины бисектора (для линия марганца)

ляются удаляющимися горизонтальными потоками, и бисекторы демонстрируют красный сдвиг [12].

Линия Mn I имеет большую ширину вследствие сверхтонкой структуры [8]. Из-за оптической накачки от линии Mg II 279.55 нм [32] ранее считалось [15], что она чувствительна и к хромосферным условиям. Однако в работе [35] показано, что в действительности линия имеет исключительно фотосферное происхождение — она чувствительна к магнитным полям под хромосферной сеткой, в флоккулах и полярных факелах, и может рассматриваться как прокси-магнитометр.

Поведение бисекторов линии Mn I 539.4 нм акцентировано повторяет основные закономерности линий железа: для  $\mu < 0.6$  фиолетовый сдвиг сменяется красным смещением, а S-образный прогиб бисектора изменяется на противоположный. Такие результаты несколько отличаются от данных [34], где на краю диска зафиксирован S-образный бисектор. Но следует отметить, что в работе [34] сканирование диска Солнца, в отличие от нашего исследования, проводилось в экваториальном направлении.

Сильный лимб-эффект демонстрирует линия Fe II 532.55 нм. Причина этого в том, что линии ионов имеют высокую чувствительность к более горячей плазме и поэтому сильнее сдвигаются в фиолетовую сторону в центре диска.

Отметим, что лимб-эффект показывает наибольшее значение при сравнении смещений в ядрах слабых линий. А вот сильные линии демонстрируют максимальное красное смещение при сравнении средней части бисекторов. Такая зависимость лимб-эффекта от глубины линии определяется изменением вертикальных скоростей с высотой солнечной атмосферы. В крыльях линии (верхняя часть бисектора) лимб-эффект завуалирован падением точности измерений.

**Выводы.** Предложенный способ измерения двухмерного спектра Солнца позволяет с высокой точностью сравнить спектры и отдельные профили линий для разных гелиоцентричных углов. Преимуществом предложенного метода является одновременность регистрации спектров в центре и на краю диска Солнца. Это повышает точность определения абсолютных сдвигов спектров, измеренных на разных  $\mu$ . С другой стороны, большая чувствительность к абберациям оптической системы спектрографа частично нивелирует преимущества метода, так как дополнительно вносятся существенные инструментальные ошибки. Для 11 выбранных спектральных линий получены количественные характеристики изменения их профилей при переходе центр — край. В дальнейшем мы планируем исследовать причины этих закономерностей.

Авторы благодарны В. Г. Беспалько за помощь при проведении наблюдений.

1. Атрощенко И. Н., Гадун А. С., Гопасюк С. И. и др. Вариации глобальных характеристик Солнца. К.: Наук. думка, 1991. С. 182—231.
2. Григорьева С. А., Теплицкая Р. Б., Ожогина О. А. Потемнение к краю диска в крыльях линии К Ca II. Сравнение с моделью среднего спокойного Солнца. *Астрон. журн.* 2009. 86, № 6. С. 616—624.
3. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. К.: Наук. думка, 1989. 200 с.
4. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976. 392 с.
5. Макарова Е. А., Рощина Е. М., Сарычев А. П. Средние данные о потемнении диска Солнца к краю в квазиконтинууме в спектральной области 300—2400 нм. *Астрон. журн.* 1991. 68, № 4. С. 885—889.
6. Осипов С. Н. Потемнение к краю солнечного диска с учетом линий поглощения. *Кинематика и физика небес. тел.* 1987. 3, № 5. С. 57—64.
7. Осипов С. Н. Инструментальный контур спектрографа солнечного телескопа АЦУ-5 Главной астрономической обсерватории НАН Украины. *Кинематика и физика небес. тел.* 2015. 31, № 5. С. 72—80.
8. Abt A. Hyperfine structure in the solar spectrum. *Astrophys. J.* 1952. 115. P. 199—205.
9. Allende Prieto C., Asplund M., Fabiani Bendicho P. Center-to-limb variation of solar line profiles as a test of NLTE line formation calculations. *Astron. and Astrophys.* 2004. 423. P. 1109—1117.
10. Ambruso P., Marmolino C., Gomez M. T., Severino G. The center-to-limb variations of four Ca I lines in the photospheric spectrum at 6500 Å. *Solar Phys.* 1992. 141, N 1. P. 35—49.
11. Balthasar H. Asymmetries and wavelengths of solar spectral lines and the solar rotation determined from Fourier-transform spectra. *Solar Phys.* 1984. 93. P. 219—241.
12. Balthasar H. On the contribution of horizontal granular motions to observed limb-effect curves. *Solar Phys.* 1985. 99. P. 31—38.
13. Brault J. W. Solar Fourier transform spectroscopy. *Osserv. Mem. Oss. Astrofis. Arcetri.* 1978. 106. P. 33.
14. Brault J. W. Fourier transform spectroscopy. *High Resolution in Astronomy. Fifteenth Advanced Course of the Swiss Society of Astronomy and Astrophysics* (Eds A.O. Benz, M. Huber, and M. Mayer), 1985. P. 3—61.
15. Doyle J. G., Jevremović D., Short C. I., Hauschildt P. H., Livingston W., Vince I. Solar Mn I 5432/5395 E line formation explained. *Astron. and Astrophys.* 2001. 369. P. L13—L16.
16. Dravins D. “Ultimate” information content in solar and stellar spectra. Photospheric line asymmetries and wavelength shifts. *Astron. and Astrophys.* 2008. 492. P. 199—213.
17. Fathivavsari H., Ajabshirizadeh A., Koutchmy S. Spectral atlases of the Sun from 3980 to 7100 Å at the center and at the limb. *Astrophys. and Space Sci.* 2014. 353, N 2. P. 347—355.
18. Faurobert M., Ricort G., Aime C. Empirical determination of the temperature stratification in the photosphere of the quiet Sun. *Astron. and Astrophys.* 2013. 554. id. A116. 10 p.
19. Grigoryeva S. A., Turova I. P. Center-to-limb variations of the Ca II H and K lines in sunspot umbrae. *Solar Phys.* 1998. 179, N 1. P. 17—30.
20. Khomenko E. V., Kostik R. I., Shchukina N. G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes. *Astron. and Astrophys.* 2001. 369. P. 660—671.
21. Kiselman D., Pereira T. M. D., Gustafsson B., Asplund M., Meléndez J., Langhans K. Is the solar spectrum latitude-dependent? An investigation with SST/TRIPPEL. *Astron. and Astrophys.* 2011. 535. id.A14. 9 p.

22. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team (2018). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.6), [Online]. URL: <https://physics.nist.gov/asd> [2018, November 1]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
23. Langhans K., Schmidt W. Center-to-limb-variation of the G-band lines at 430.5 nm. *Astron. and Astrophys.* 2002. 382. P. 312—318.
24. Moore C. E. A Multiplet table of astrophysical interest. NSRDS-NBS40 — 1972. 261 p.
25. Neckel D., Labs H. The solar radiation between 3300 and 12500 Å. *Solar Phys.* 1984. 90, N 2. P. 205—358.
26. Pereira T. M. D., Asplund M., Collet R., Thaler I., Trampedach R., Leenaarts J. How realistic are solar model atmospheres? *Astron. and Astrophys.* 2013. 554. id. A118. 16 p.
27. Pierce A. K., Slaughter C. D. Solar limb darkening I: (3033—7297). *Solar Phys.* 1977. 51. P. 25—41.
28. Rodriguez Hidalgo I., Collados M., Vazquez M. Variations of properties of the quiet photosphere along the equator and the central meridian: Spectroscopic results. *Astron. and Astrophys.* 1994. 283, N 1. P. 263—274.
29. Stenflo J. O. FTS atlas of the Sun's spectrally resolved center-to-limb variation. *Astron. and Astrophys.* 2015. 573. A74.
30. Stenflo J. O., Twerenbold D., Harvey J. W., Brault J. W. Coherent scattering in the solar spectrum. — Survey of linear polarization in the range 4200—9950 Å. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1983. 54. P. 505—514.
31. Supriya H. D., Smitha H. N., Nagendra K. N., Stenflo J. O., Bianda M., Ramelli R., Ravindra B., Anusha L. S. Center-to-limb observations and modeling of the Ca I 4227 Å line. *Astrophys. J.* 2014. 793, N 1. id. 42. 13 p.
32. Thackeray A. D. The excitation of emission lines in late-type variables. *Astrophys. J.* 1937. 86, P. 499—508.
33. Thevenin F. Oscillator strengths from the solar spectrum. *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* 1989. 77. P. 137—154.
34. Vince I., Vince O., Ludmany A., Andriyenko O. The Mn I 539.47 nm line variation in solar active regions. *Solar Phys.* 2005. 229. P. 273—285.
35. Vitas N., Viticchie B., Rutten R. J., Vogler A. Explanation of the activity sensitivity of Mn I 5394.7 Å. *Astron. and Astrophys.* 2009. 499. P. 301—312.

*C. M. Ocínov, I. E. Васильєва*

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,  
Київ, Україна

#### ФРАУНГФЕРОВІ ЛІНІЇ ПРИ ПЕРЕХОДІ ВІД ЦЕНТРА ДО КРАЮ СОНЯЧНОГО ДИСКА

На телескопі АЦУ-5 ГАО НАН України після заміни штатного головного дзеркала на короткофокусне (з фокусною відстанню 1 м) зареєстровано двовимірні спектри Сонця (від центра до краю диска) в ділянках  $\lambda = 532.0...532.8$  та  $539.1...539.9$  нм. Перевагою застосованого методу є одночасність реєстрації спектра для різних геліоцентричних позицій на сонячному диску. Проведено редукції спостережних даних за вплив розсіяного світла у спектрографі, атмосферного розсіяного світла, інструментального контура спектрографа та деяких аберацій. Проведено порівняння відношень спектрів центр/край з наявними літературними даними. Для 11 спектральних ліній отримано дані про зміни профілів при переході від центра до краю сонячного диска. Виявлена немонотонність таких змін пояснена неоднорідностями фізичних умов на поверхні Сонця. В цілому глибини досліджуваних ліній Fe I демонстру-

ють тенденцію зменшення сили ліній при переході до лімба. Півширини більшості ліній збільшуються до краю диска. Еквівалентні ширини показують різнонаправлені зміни. Зміни параметрів лінії Mn I 539.4 нм мають особливість: всі три досліджуваних параметри збільшуються до краю диска, хоча біля самого лімба глибина і еквівалентна ширина також починають зменшуватись. Виміряно лімба-ефект ліній, який показує найбільше значення при порівнянні положень ядер слабких ліній. Сильні лінії демонструють максимальний лімба-ефект при порівнянні середніх частин бісекторів ліній.

**Ключові слова:** Сонце, фотосфера, спектральні лінії, потемніння до краю, бісектор, лімба-ефект.

*S. N. Osipov, I. E. Vasileva*

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine

#### FRAUNHOFER LINES IN THE TRANSITION FROM THE CENTER TO THE LIMB OF THE SOLAR DISK

The two-dimensional spectra of the Sun (from the center to the limb of the disk) in sections = 532.0...532.8 and 539.1...539.9 nm were recorded at the ATsU-5 telescope of the National Academy of Sciences of Ukraine by replacing the regular main mirror with a short-focus one (with a focal length of 1 m). The advantage of the applied method is the simultaneity of spectrum recording for different heliocentric positions of the solar disk. The reductions of observational data for the influence of scattered light in the spectrograph, atmospheric stray light, instrumental contour of the spectrograph, and some aberrations were carried out. The center/limb spectral relations are compared with the available literature data. Data on variations of spectral line profiles in the transition from the center to the limb of the solar disk are obtained for 11 spectral lines. The revealed non-monotony of such changes is explained by inhomogeneities of physical conditions on the surface of the Sun. In general, the depths of the studied Fe I lines demonstrate a tendency to decrease the strength of the lines when going to the limb. The line full widths at half maximum of most lines increase to the limb of the disk. Equivalent widths show differently directed variation. Changes of the parameters of the Mn I 539.4 nm line stand out from the general row: all three parameters studied grow to the edge of the disk, although at the extreme limb the depth and equivalent width also begin to decrease. Measured limb-effect of lines demonstrates the highest value when comparing the positions of the core of weak lines. Strong lines show the maximum limb effect when comparing the middle part of the bisectors.

**Key words:** Sun, photosphere, spectral lines, solar limb darkening, bisector, limb effect.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2018

Після доробки 15.11.2018

Прийнята до друку 26.11.2018