

УДК 523.947

## ЦВЕТ КОНТИНУУМА КОРОНЫ 11.07.1991 г.

© 2020 г. И. С. Ким<sup>1, \*</sup>, Н. Л. Крусанова<sup>1</sup>, В. В. Попов<sup>1</sup>,  
А. Р. Осокин<sup>1</sup>, И. В. Миронова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ),  
г. Москва, Россия

\*e-mail: iraida.kim@gmail.com

Поступила в редакцию 17.02.2019 г.

После доработки 10.09.2019 г.

Принята к публикации 23.01.2020 г.

Представлены результаты поиска проявлений расширения короны, основанные на определении цвета коронального континуума из наблюдений. В кратком обзоре исследований определения цвета континуума короны отмечена противоречивость ранее полученных результатов. Дано определение показателя цвета для континуума короны, обоснована необходимость применения относительного показателя цвета  $RCI$ , сделаны оценки ожидаемых значений  $RCI$  в зависимости от скорости электрона. Построено 2D-распределение  $RCI$  для короны 11.07.1991 г. Сравнение распределения со структурой короны иллюстрирует отсутствие тождественности спектров короны и фотосферы и выявляет покраснение с расстоянием по всей короне на всех позиционных углах. Отмечено, что распределения  $RCI$  для корон 11.07.1991 г. и полученное нами ранее для короны 29.03.2006 г. являются первыми подтверждениями теоретических расчетов о смещении спектра континуума в красную сторону вследствие потоков электронов, распространяющихся от Солнца во всем объеме короны.

DOI: 10.31857/S0016794020040070

### 1. ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени немногочисленные исследования цвета континуума солнечной короны выполняются только по материалам, полученным во время полных солнечных затмений (ПСЗ). Абсолютно ясное небо и высота центра диска Солнца  $>30^\circ$  обеспечивают пригодность материала для определений цвета коронального континуума. Кратко напомним терминологию, используемую ниже.

– Состав коронального вещества: электроны, ионы и незначительная доля нейтралов.

–  $R$  – расстояние в единицах радиуса диска Солнца ( $R_\odot$ ), отсчитываемое от центра Солнца.

– Речь будет идти о короне, наблюдаемой в непрерывном спектре видимого диапазона. Излучение в непрерывном спектре обусловлено в основном электронной составляющей, так называемой  $K$ -коронной. Свечение  $K$ -короны объясняется томсоновским рассеянием. Классическое томсоновское рассеяние, подразумевающее рассеяние низкочастотных квантов излучения фотосферы на свободных покоящихся электронах, не зависит от длины волны. В последнюю декаду термин томсоновское рассеяние часто применяют при

описании рассеяния на движущихся нерелятивистских электронах.

– Определение “цвета” (далее без кавычек) континуума короны основано на сравнительном анализе распределений энергии континуумов короны и фотосферы спектральными или фильтровыми методами. При идентичности распределений принято говорить о белом цвете (белой короне), при смещении спектра короны в синюю область спектра – о “посинении”, в красную – о “покраснении” (далее – без кавычек).

Обширный обзор исследований по определению цвета континуума, выполненных до 50-х гг. прошлого столетия, представлен Shklovsky [1965]. Обзоры работ до 80-х гг. можно найти в статьях [Dorotovic and Rybansky, 1977; Aimanov and Nikolsky, 1983; Nikolskij and Nesmyanovich, 1983]. Сообщалось о посинении, покраснении в определенных областях, а также о тождественности спектров. При этом покраснение интерпретировалось, как правило, вкладом пылевой составляющей (пылевых колец).

Возрождение интереса к сравнению континуумов короны и фотосферы обусловлено появлением работы Cram [1976], который теоретически показал возможность получения информации о скорости электронов ( $v$ ) и электронной темпера-

туре ( $T_e$ ) из измерений отношения интенсивностей на 410 и 390 нм. Через 20 лет Ichimoto et al. [1996], используя другую пару реперных длин волн (430 и 390 нм), экспериментально подтвердили такую возможность, определив  $T_e$  и  $v$  по результатам наблюдений во время ПСЗ 1994 г. Позднее Reginald and Davila [2000] модифицировали подход и применили волоконную оптику для получения  $T_e$  и  $v$  по нескольким направлениям в короне. Отметим возможные недостатки спектральных методов.

– Получение информации только вдоль одного или нескольких (в случае применения волоконной оптики) направлений, а не по всей короне.

– Излучение фотосферы слабо поляризовано. Согласно расчетам Stenflo [2005], в используемом нами диапазоне длин волн степень поляризации континуума изменяется от 0.1% на 400 нм до 0.01% на 660 нм. Свечение короны в видимом диапазоне частично линейно поляризовано: степень линейной поляризации вблизи лимба Солнца составляет 15–18%, что на 2–3 порядка выше степени поляризации фотосферного континуума. Возможно искажение результатов сравнения слабо поляризованного непрерывного спектра фотосферы и частично линейно поляризованного континуума короны вследствие инструментальной поляризации спектрографа [Lipskii, 1958]. Этот фактор пока никем не учитывается.

И, наконец, эпохальная, на наш взгляд, работа Reginald et al. [2009], в которой теоретически показано, что при наличии потоков электронов, распространяющихся от Солнца по всему объему короны (“расширение короны”, далее без кавычек), для наблюдателя на Земле должно регистрироваться смещение континуума короны в красную сторону по всей короне (на всех позиционных углах). Ниже мы обсуждаем только тепловые электроны. Возможность диагностики нетепловых электронов из сравнительного анализа континуумов короны и фотосферы показана Koutchmy and Nikoghossian [2002].

В данной работе представлен поиск расширения короны, основанный на определении цвета коронального континуума. В кратком обзоре исследований определения цвета континуума короны отмечена противоречивость ранее полученных результатов (1). Дано определение показателя цвета для континуума короны, обоснована необходимость применения относительного показателя цвета  $RCI$ , сделаны оценки ожидаемых значений  $RCI$  в зависимости от скорости электрона (2). Представлено 2D- распределение  $RCI$  для короны 11.07.1991 г., проведен сравнительный анализ распределения со структурой короны. Полученное распределение иллюстрирует отсутствие тождественности спектров короны и фотосферы и выявляет покраснение с расстоянием по

всей короне на всех позиционных углах. Отмечено, что 2D-распределения  $RCI$  для короны 11.07.1991 г. и полученное нами ранее для короны 29.03.2006 г. [Kim et al., 2017] являются первыми наблюдательными подтверждениями теоретических расчетов Reginald et al. [2009] о смещении спектра континуума в красную сторону вследствие потоков электронов, распространяющихся от Солнца во всем объеме короны (4).

## 2. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЦВЕТА КОНТИНУУМА

В реальной короне рассеивание непрерывного спектра фотосферы происходит на движущихся электронах. Для нерелятивистских электронов можно ожидать смещение рассеянного спектра, обусловленное эффектом Доплера. Электроны, движущиеся от Солнца (к Солнцу), рассеивают фотосферное излучение, смещая его по длине волны в красную (синюю) часть спектра соответственно. Для поиска наблюдательных подтверждений теории Reginald et al. [2009] мы отказались от традиционных методов, основанных на следующем.

– Абсолютные калибровки по серпу Солнца во время частных фаз, которые выполняются до или после полной фазы. Промежуток времени составляет 30–60 мин. Отсюда необходимость учета высоты Солнца и неконтролируемое изменение состояния земной атмосферы.

– Применение “нейтральных” радиальных фильтров, для которых зависимость пропускания от длины волны, как правило, не исследуется.

– Применение спектральных методов (см. выше).

Широкополосный фильтровый метод, основанный на применении цветных фотопленок или цветных ПЗС приемников, обеспечивает одновременную регистрацию на один кадр изображений короны в красной, зеленой и синей областях спектра. Эффективная ширина “фильтров” (FWHM – полная ширина на половинном пропускании), как правило,  $\approx 80$  нм. Фотометрическая обработка позволяет выделить сигналы, соответствующие синей и красной областям спектра, для последующего сравнения. Известно, что в первом приближении спектры фотосферы в области 300–1000 нм аппроксимируются функцией Планка с  $T = 5800$  К. Отнесенная к единичному интервалу длин волн, функция Планка рассеянного спектра в единицах эрг  $\text{см}^{-3} \text{с}^{-1}$  имеет вид

$$\varepsilon(\lambda, T) = \pi B_\lambda(T) = \frac{2\pi h}{\lambda^5} \frac{c^2}{e^{hc/kT\lambda}}, \quad (1)$$

где  $\lambda = \lambda^0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$  – длина волны рассеянного спектра;  $\lambda^0$  – длина волны спектра фотосферы;  $k$  и  $h$  – постоянные Больцмана и Планка соответственно;  $v$  – скорость электрона;  $c$  – скорость света. На рисунке 1а показан спектр Солнца в относительных единицах, аппроксимированный функцией Планка (сплошная линия) и спектры, рассеянные электронами, движущимися от Солнца (штриховая линия) и к Солнцу (штрихпунктирная линия) со скоростью 10000 км/с. Пунктирными вертикальными линиями показаны длины волн, соответствующие максимумам пропускания “фильтров” (свертки  $S$  кривых спектральной светочувствительности синего и красного слоев фотопленки Fujichrome Velvia 100 со спектром Солнца, рис. 1б).

Оценим ожидаемое изменение цвета коронального континуума, обусловленное эффектом Доплера при рассеянии излучения фотосферы на движущихся электронах. Кривые спектральной светочувствительности Fujichrome Velvia 100F аппроксимируем гауссианой

$$\phi(\lambda_{r(b)}) = 2e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_{r(b)} - \lambda_{r(b)\text{eff}}}{\Delta\lambda} \right)^2}. \quad (2)$$

Пусть ширина полосы пропускания “фильтров”  $2\Delta = 80$  нм. Определим показатель цвета континуума короны как

$$C = \frac{I_r^{sc} / I_b^{sc}}{I_r^0 / I_b^0}, \quad (3)$$

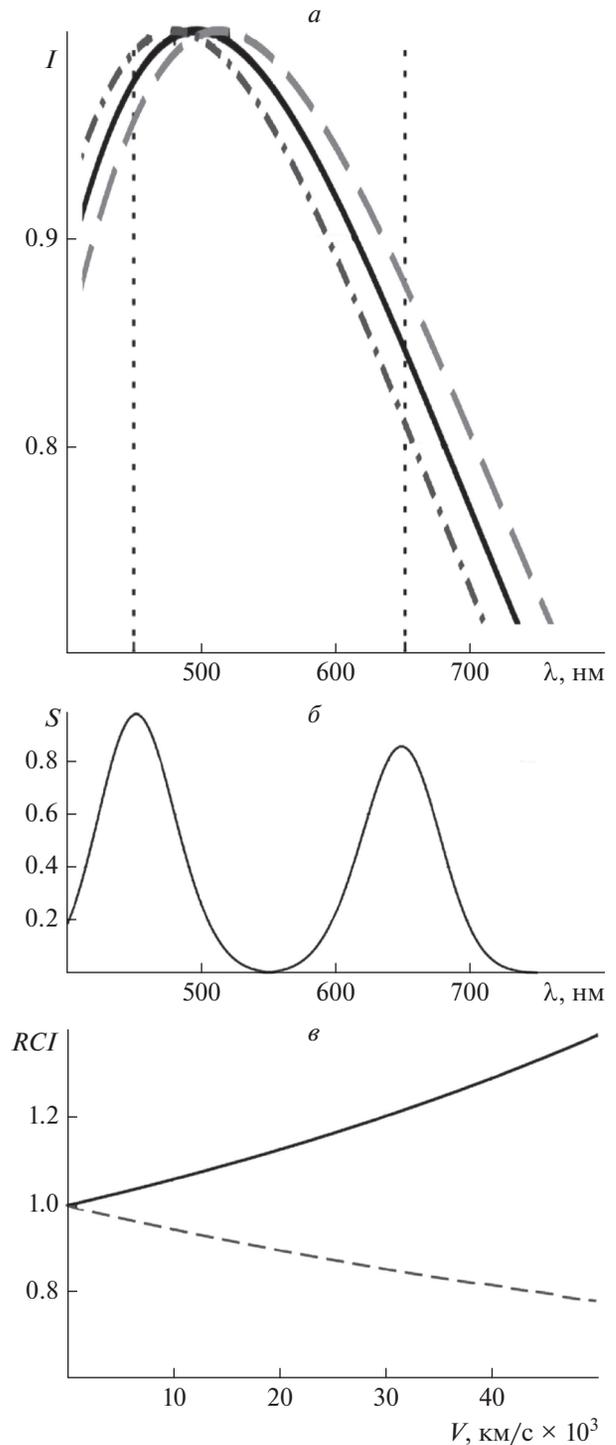
где  $I_r^0$  и  $I_b^0$  – значения интегральной интенсивности в красной и синей областях спектра фотосферы, а  $I_r^{sc}$  и  $I_b^{sc}$  – значения интегральной интенсивности в красной и синей областях рассеянного спектра. Интегральная интенсивность определяется выражением

$$I_{r(b)} = \int_{\lambda_{r(b)} - \Delta\lambda}^{\lambda_{r(b)} + \Delta\lambda} \epsilon \left( \lambda_{r(b)} \left( 1 \pm \frac{v}{c} \right) T \right) \phi(\lambda_{r(b)}) d\lambda_{r(b)}, \quad (4)$$

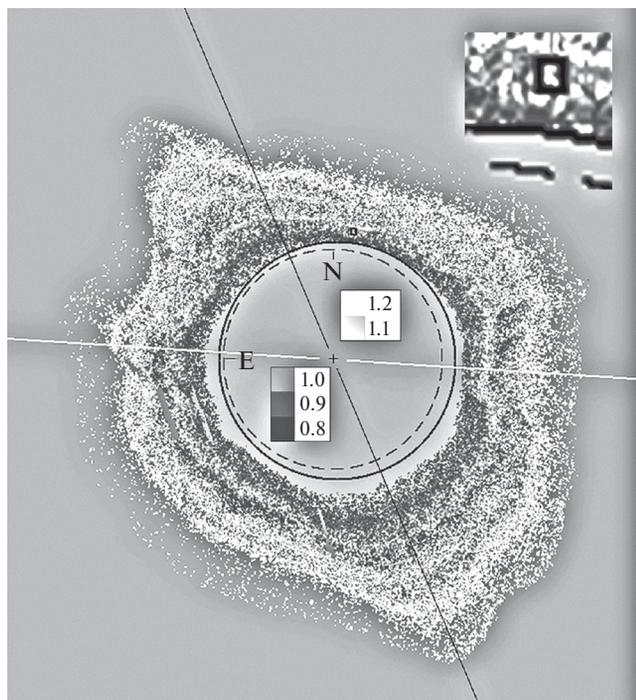
где  $\epsilon$  определяется выражением (1), а  $\phi$  – выражением (2). Введем относительный показатель цвета  $RCI$ , определяемый выражением

$$RCI = \frac{C^{\text{cor}}}{C^{\text{ref}}} = \frac{I_{\text{red}}^{\text{cor}} / I_{\text{blue}}^{\text{cor}}}{I_{\text{red}}^{\text{ref}} / I_{\text{blue}}^{\text{ref}}},$$

где  $C^{\text{ref}}$  – показатель цвета для реперной области. Все величины в выражении получаются одновременно на одном кадре во время полной фазы солнечного затмения. В качестве реперной области используем область в короне, для которой радиальная скорость электронов, по нашему мнению, минимальна. Это слабая составляющая нашего



**Рис. 1.** (а) – спектр Солнца в относительных единицах, аппроксимированный функцией Планка (сплошная линия) и спектры, рассеянные электронами, движущимися к Солнцу (штрихпунктирная линия) и от Солнца (штриховая линия) со скоростью 10000 км/с. (б) – свертка кривых спектральной светочувствительности Fujichrome Velvia 100F в синей и красной областях спектра со спектром Солнца, аппроксимированным функцией Планка для  $T = 5800$  К. (в) – расчетный относительный показатель цвета  $RCI$  в зависимости от скорости электрона, движущегося к Солнцу (сплошная линия) и от Солнца (пунктир).



**Рис. 2.** 2D-распределение  $RCI$  для короны 11.07.1991 г. Показаны направления N и E, центр диска Солнца (крестик), лимбы Солнца (пунктир) и Луны (сплошная линия), проекции эклиптики (белая прямая линия) и гелиосферного токового слоя (черная прямая линия) на “плоскость” неба. На диске Луны приведены шкалы  $RCI$ : темные тона соответствуют посинению ( $RCI < 1$ ), светлые – покраснению ( $RCI > 1$ ). В правом верхнем углу в увеличенном масштабе показан фрагмент короны, содержащий реперную область (квадратик), локализованный между полярными щеточками:  $P = 350^\circ$ ,  $R = 1.15\text{--}1.18R_\odot$ . В правом верхнем углу в увеличенном масштабе показана площадка, выбранная в качестве реперной области, для которой  $RCI = 1$ .

подхода, которая, тем не менее, значительно “сильнее” абсолютной калибровки по серпам фотосферы во время частных фаз. На рисунке 1в показана расчетная зависимость  $RCI$  от скорости электрона. Для длин волн 450 и 650 нм и скоростей электронов 10000 км/с в случае движения электронов от Солнца (к Солнцу)  $RCI$  составляет 1.05 (0.95) соответственно. Ожидаемые скорости электронов на порядок ниже. Следовательно, точность 1–2% необходима для определений относительного показателя цвета коронального континуума. Отметим, что учет трехмерной структуры реальной короны (интегрирования по лучу зрения) неизбежно изменит значения  $RCI$ .

Подробности нашего подхода, специфики оборудования, особенностей процедуры наблюдений, компьютерной обработки данных представлены ранее [Kim et al., 2011].

### 3. 2D РАСПРЕДЕЛЕНИЕ $RCI$ ДЛЯ КОРОНЫ 11.07.1991 г.

Ниже представлен результат ретроспективного анализа  $RCI$  для короны эпохи максимума солнечной активности. Полоса полной фазы солнечного затмения 11.07.1991 г., самого длительного в прошлом столетии (максимальная продолжительность полной фазы составляла 6 мин 53 с), проходила над Тихим океаном, пересекала Гавайские о-ва, Центральную и Южную Америку. Наблюдения проводились в г. Хохутла (Jojutla, Mexico):  $18.61^\circ \text{ N}$ ,  $99.18^\circ \text{ W}$ , высота над уровнем моря – 890 м; продолжительность полной фазы – 6 мин 07 с; высота центра диска Солнца в середине полной фазы –  $80^\circ$ ; eclipse magnitude – 1.08. Оборудование: фотокамера “Зенит TTL”, объектив “МС 3М-5СА, цветная позитивная пленка Fujichrome Velvia 100 в качестве приемника излучения. Фотографирование короны проведено при абсолютно ясном небе. Абсолютная калибровка по диску Солнца не выполнялась. Оцифровка выполнена на PDS “Perkin-Elmer Model 1010” Астрономической обсерватории Кореи (Korean National Observatory) в синей и красной спектральных областях. Щель ( $0.02 \times 0.02$ ) мм<sup>2</sup> соответствовала ( $8'' \times 8''$ ) в картинной плоскости. Использовались фильтры Kodak Wratten Filter N 94 ( $\lambda_{\text{eff}} = 450$  нм) и Kodak Wratten Filter N 92 ( $\lambda_{\text{eff}} = 660$  нм).

На рисунке 2 представлено 2D-распределение  $RCI$  для короны 11.07.1991 г. Показаны направления N и E, центр диска Солнца (крестик), лимбы Солнца (штриховая линия) и Луны (сплошная линия), соответствующие середине промежутка времени для использованной серии экспозиций, проекции эклиптики (белая прямая линия) и гелиосферного токового слоя (черная прямая линия) на “плоскость” неба. Шкалы  $RCI$  приведены на диске Луны, темные тона соответствуют посинению ( $RCI < 1$ ), светлые – покраснению ( $RCI > 1$ ). В правом верхнем углу в увеличенном масштабе показан фрагмент короны, содержащий реперную область (квадратик), локализованную между полярными щеточками, плюмами:  $P = 350^\circ$ ,  $R = 1.15\text{--}1.18R_\odot$ . Для этой области условно принято  $RCI = 1$ . 2D-распределение  $RCI$  имеет вытянутую форму, ориентированную приблизительно вдоль средней плоскости ГТС, которая имеет значительное отклонение от плоскости эклиптики и экватора Солнца ( $\approx 67^\circ$ ). Крупномасштабные и мелкомасштабные структуры повторяют по позиционным углам структуру короны. Полученное распределение выявляет покраснение с расстоянием по всей короне на всех позиционных углах.

Для короны 11.07.1991 г. характерно отсутствие симметричной структуры, типичной для эпохи максимума. Необычная для фазы максимума солнечной активности ориентация крупномасштабных шлемовидных стримеров и их распределение

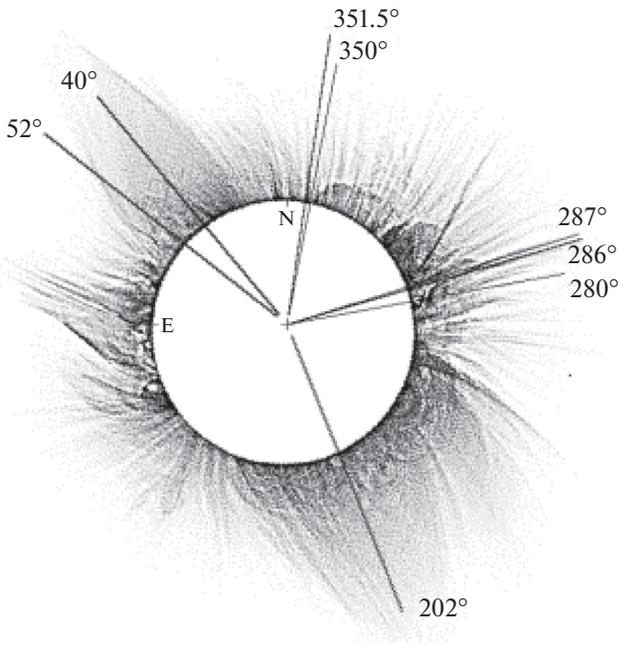


Рис. 3. Структура короны 11.07.1991 г. Показаны N- и E-направления, центр Солнца и позиционные углы для некоторых структур.

по лимбу Солнца обусловлено значительным отклонением средней плоскости гелиосферного токового слоя (ГТС) от плоскости экватора: корона наблюдалась “с ребра” [Gulyaev, 1992]. Для сравнительного анализа использовалась структура, выделенная нами из составного изображения Druckmüller (<http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/Eclipse/Index.htm>), основанного на кадрах, полученных в Todos Santos, Baja California, Mexico (рис. 3). Разница во времени между наблюдениями в Joutla и Todos Santos составила ~ 30 мин, что, как правило, меньше характерного времени изменения крупномасштабных корональных структур. Показаны направления N и E, радиальные разрезы, соответствующие структурам короны, крестиком отмечен центр Солнца на момент, соответствующий середине серии экспозиций в Joutla, использованной нами. Позиционные углы  $P = 40^\circ$  и  $202^\circ$  соответствуют серединам NE и SW крупномасштабных шлемовидных стримеров, ориентированных приблизительно радиально,  $P = 52^\circ$  – периферии NE стримера,  $P = 286^\circ$  и  $287^\circ$  – тонким линейным стримерам, локализованным над активным W-лимбом,  $P = 280^\circ$  – прилегающей короне;  $P = 351.5^\circ$  – структуре, отождествляемой с полярной щеточкой,  $P = 350^\circ$  – “диффузная” корона между полярными щеточками.

– Сравнительный анализ 2D-распределения  $RCI$  и структуры короны (рис. 2 и 3) позволяет отметить вытянутую форму, ориентированную приблизительно вдоль средней плоскости ГТС,

наличие диффузной и структурной составляющих, различные значения  $RCI$  для различных корональных структур.

– Для всех позиционных углов наблюдается относительное покраснение с удалением от Солнца. Напомним, что 2D-распределения  $RCI$  для короны 29.03.2006 г. (минимум солнечной активности), опубликованные нами ранее [Kim et al., 2017], также выявили наличие покраснения на всех позиционных углах.

– Посинение во внутренних областях короны. Различная протяженность синей области для различных структур: в крупномасштабных шлемовидных и тонких линейных стримерах эффект “посинения” наблюдается до  $\sim 1.4R_\odot$ , в полярных областях до  $\sim 1.1-1.2R_\odot$ . Обнаруженное посинение можно объяснить рассеянием спектра фотосферы на связанных электронах (ионах) и будет рассмотрено в отдельной работе.

#### 4. ВЫВОДЫ

Нет тождественности в распределениях энергии в континуумах короны и фотосферы. 2D-распределения относительного показателя цвета континуума короны ( $RCI$ ) для корон 11.07.1991 г. и 29.03.2006 г. выявляют покраснение с расстоянием по всей короне на всех позиционных углах и являются первыми наблюдательными подтверждениями теоретических расчетов Reginald et al. [2009] о смещении спектра коронального континуума в красную сторону вследствие потоков электронов, распространяющихся от Солнца во всем объеме короны. Поэтому цвет континуума можно рассматривать как индикатор расширения короны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Aimanov A.K., Nikolsky G.M. The colour of the solar corona and dust grains in it // *Solar Phys.* V. 65. P. 171–179. 1980.  
<https://doi.org/10.1007/BF00151391>

– Cram L.E. Determination of the temperature of the solar corona from the spectrum of the electron-scattering continuum // *Solar Phys.* V. 48. P. 3–19. 1976.  
<https://doi.org/10.1007/BF00153327>

– Dorotovic I., Rybansky M. What should the colour of the solar corona be? // *Solar Phys.* V. 172. P. 207–213. 1977.  
<https://doi.org/10.1023/A:1004993326297>

– Gulyaev R.A. The Solar Corona – Flat Formation // *Solar Phys.* V. 142. P. 213–216. 1992.  
<https://doi.org/10.1007/BF00156645>

– Ichimoto K., Kumagai K., Sano I. et al. Measurement of the coronal electron Temperature at the Total Solar Eclipse on 3rd Nov. 1994 // *Publ. Astron. Soc. Japan.* V. 48. P. 545–554. 1996.

– Kim I.S., Kroussanova N.L., Pavlov M.V. et al. Color of coronal structures derived from the Eclipse White-light Co-

- rona Polarization Movies // *Astr. Soc. P. V.* 437. P. 211–215. 2011.
- *Kim I.S., Nasonova L.P., Lisin D.V. et al.* Imaging the structure of the low K-corona // *J. Geophys. Res. Space. V.* 122. № 2. P. 77–88. 2017.  
<https://doi.org/10.1002/2016JA022623>
- *Koutchmy S., Nikoghossian A.G.* Coronal linear supra-thermal streams // *Astron. Astrophys. V.* 395. P. 983–989. 2002.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021269>
- *Lipsky Y.N.* Dependence of the equivalent width of coronal lines on the polarization degree of the coronal continuum // *Astron. Zh. V.* 35. P. 662–665. 1958.
- *Nikolskij G.M., Nesmyanovich I.A.* Color photometry of the solar corona on July 31, 1981 // *Soviet Astronomy. V.* 60. P. 1179–1186. 1983.
- *Reginald N.L., Davila J.M.* MACS for global measurements of the solar wind velocity and the thermal electron temperature during the total solar eclipse of 11 August 1999 // *Solar Phys. V.* 195. P. 111–122. 2000.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-009-9457-z>
- *Reginald N.L., Cyr O.C. S., Davila J.M. et al.* Electron temperatures and its bulk flow speeds in the low solar corona measured during the total solar eclipse on 29 March 2006 in Libya // *Solar Phys. V.* 260. P. 347–361. 2009.  
<https://doi.org/10.1007/s11207-009-9457-z>
- *Shklovsky I.* *Physics of the Solar Corona.* Oxford: Pergamon press, 475 p. 1965.
- *Stenflo J.O.* Polarization of the Sun's continuous spectrum // *Astron. Astrophys. V.* 429. P. 713–730. 2005.  
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041667>