

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕЛЕННОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ЛИНИИ С ВЫСОТОЙ ПО ВНЕЗАТМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА 24-й ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2023 г. С. А. Гусева<sup>1</sup>, \*, А. Д. Шрамко<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Горная астрономическая станция Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН,  
Кисловодск, Россия

\*svgual@yandex.ru

\*\*a\_shramko@inbox.ru

Поступила в редакцию 02.06.2022 г.

После доработки 09.10.2022 г.

Принята к публикации 18.10.2022 г.

Представлены результаты исследований эмиссионной корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  (Fe XIV) за период 24-го цикла солнечной активности. Спектральные данные получены на внезатменном коронографе системы Лио, установленном на Горной астрономической станции ГАО РАН (близ г. Кисловодска). В результате обработки внезатменных наблюдений создана база данных трех видов ежедневных корональных карт с распределением по высоте  $h$  от  $1R_{\odot}$  до  $1.38R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  – радиус Солнца) значений интенсивности зеленой линии ( $I_{5303}$ ). Выявлены и отождествлены некоторые неоднородности вдоль линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ , которые связаны с конфигурацией магнитных полей в короне Солнца над активными областями. Проведены вычисления протяженности зеленой линии от позиционного угла Солнца. Показано, что временное распределение протяженности линии в полярных областях имеет два максимума, которые совпадают с моментами переполосовки полярного магнитного поля на Солнце. Максимальные значения средней протяженности корональной линии по всему лимбу приходятся на 2012–2014 гг. Для разных фаз (для ветви подъема, в период максимума, для ветви спада и минимума солнечной активности) данного солнечного цикла и для разных областей активности Солнца построены, и исследованы зависимости изменения с высотой значений  $I_{5303}$ . Представлены уравнения регрессии этих аппроксимирующих кривых. Изменение  $I_{5303}$  с высотой для полярных областей с наибольшей вероятностью определяется логарифмической функцией, а аппроксимирующие кривые тренда для остальных широтных зон определяются степенной функцией третьего порядка.

DOI: 10.31857/S0023420622600180, EDN: LTHWMK

### ВВЕДЕНИЕ

Природа дала нам возможность наблюдать впечатляющее астрономическое событие – солнечную корону, вспыхивающую во время полного затмения Солнца. Научное изучение спектра короны Солнца началось с солнечного затмения 7.VIII.1869, когда на фоне непрерывного спектра Солнца впервые наблюдали ярко-зеленую линию. Первые научные исследования солнечной короны проводились во время редких полных затмений Солнца. Впервые наблюдали солнечную корону вне затмения в 1931 г. на обсерватории Пик-дю-Миди (Сер, Франция, *фр.* Observatoire du Pic du Midi), благодаря изобретению французским астрономом Б. Лио (*фр.* Bernard Lyot) коронографа [1]. Шведский астроном Б. Эдлен (*англ.* B. Edlen) в 1941 г. доказал принадлежность зеленой запрещенной спектральной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ , которая была открыта еще в 1869 г., к высокоиони-

зованному атому железа – Fe XIV [2], где потенциал ионизации 355 эВ. После этих открытий возникла всемирная сеть корональных станций, начались непрерывные внезатменные наблюдения короны Солнца: в Швейцарии – Arosa [3], во Франции – Pic du Midi (Пик-дю-Миди), в Японии – Norikura (Норикура), в США (штат Нью-Мексико) – Sacramento Peak (Сакраменто Пик), в СССР – ГАС ГАО РАН [4], в Чехословакии – Lomnický štít (Ломницки Штит) и др. Линия  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  одна из самых ярких и отражает активность на всех фазах солнечного цикла, и поэтому ее наблюдения были включены во все наблюдательные программы международных корональных станций. Во время полных солнечных затмений доступна исследованию корона на расстояниях до  $1R_{\odot}$ , а при внезатменных наблюдениях эмиссионные линии наблюдаются только до  $0.5R_{\odot}$  от лимба Солнца [5].

Изучение спектральной короны актуально и сегодня. Наблюдение и изучение солнечной короны – важнейшая задача в солнечной физике. Понимание процессов, происходящих в короне Солнца, позволит более глубоко уяснить закономерности солнечной активности (СА) и ее влияние на космическую погоду как глобально в солнечной системе, так и в частности в околоземном пространстве. Исследование интенсивности запыленных корональных линий представляет собой большой интерес для изучения физических процессов, происходящих в атмосфере Солнца. Данные эмиссионных корональных линий позволяют судить о распределении температуры и турбулентной скорости в короне Солнца, отображают эволюцию магнитных полей в активных областях (АО) Солнца.

Особенности распределения  $I_{5303}$  вдоль лимба на определенной высоте ( $h$ ) от фотосферы Солнца (например, обсерватория Ломницки Штит (*англ.* Lomnický Stit) проводила измерения  $I_{5303}$  на  $h = 60''$ , Сакраменто Пик –  $h = 141.8''$ , Пик-дю-Миди, Норикура и ГАС ГАО РАН –  $h = 40''$ ) за большие периоды времени рассматривались во многих работах [6–11]. Вычисления  $I_{5303}$  на других высотах вдоль линии не входили в мировую сеть солнечных обсерваторий и космических аппаратов “Служба Солнца”, поэтому таких исследований гораздо меньше, и они проводились за небольшие периоды времени [12–15].

Ранее мы исследовали радиальное распределение корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  на ветви спада 23-го цикла СА [16]. За 2005 г. были получены кривые изменения интенсивности  $I_{5303}$  зеленой линии на разной высоте от лимба Солнца для полярных и низкоширотных областей. Мы продолжили нашу работу для целого солнечного цикла.

Цель данной работы – это исследование изменения параметров корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  с высотой от  $1R_{\odot}$  до  $1.38R_{\odot}$  на большом наблюдательном материале.

### НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

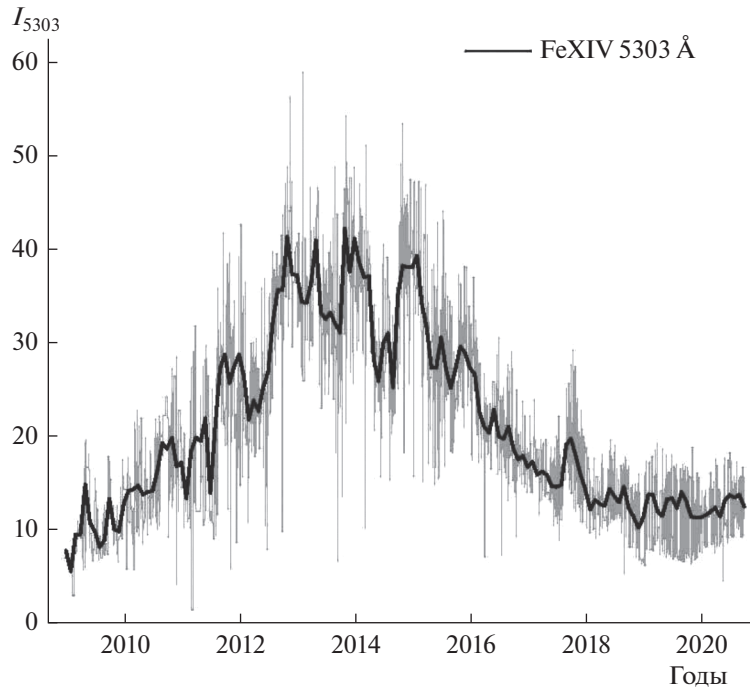
Для данной работы использовались спектральные данные зеленой корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  (Fe XIV) полученные за период 24-го цикла СА на внеатомном коронографе системы Лио ГАС ГАО РАН [17]. В рассматриваемом периоде (2009–2019) в среднем за год корональных наблюдений было 180 дней. Для фотографирования спектра короны использовались цифровые камеры Canon EOS 450D и 600D. В результате обработки, в соответствии с международной программой по “Службе Солнца”, вычисляют интенсивности корональных линий ( $I_{5303}$  и  $I_{6374}$ ) в абсолютных единицах (абс. ед.), выраженные в миллионных долях энергии, заключающейся в

интервале шириной  $1 \text{ \AA}$  непрерывного спектра центра Солнца.  $I_{5303}$  и  $I_{6374}$  измеряются на расстоянии  $40''$  ( $0.04R_{\odot}$ ) от фотосферы Солнца [18]. На рис. 1 представлен временной ряд 24-го цикла спектральной короны  $I_{5303}$  (абс. ед.) по этим данным. Спектральные наблюдения Горной астрономической станции ГАО РАН позволяют делать измерения  $I_{5303}$  вдоль линии до высоты  $6'$  ( $1.38 R_{\odot}$ ).

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОРОНАЛЬНЫХ СПЕКТРОВ

За 11 лет было 1939 дней наблюдений зеленой спектральной короны, а общее количество полученных корональных кадров составило 139608. Анализ цифровых фотографий этой корональной линии показал, что она имеет неоднородную структуру вдоль линии (рис. 2а). Над группами пятен наблюдается неравномерное падение яркости зеленой линии с высотой, вдоль линии присутствуют яркие сгустки, уплотнения, которые, по-видимому, связаны с корональными петлями [19]. Когда группа пятен находится на лимбе, то по геометрическим характеристикам корональных линий можно рассчитать расстояние между петлями и их высоту в картинной плоскости. Качество расчета конфигурации петель магнитных полей зависит от плоскости наблюдения и размера активной области, так как спектральные кадры делаются через  $5^{\circ}$  по позиционному углу, согласно международной программе “Служба Солнца” [17, 18]. Когда активная область уходит от лимба Солнца, интенсивность линии уменьшается с высотой без явных скачков.

Неоднородности вдоль линии могут наблюдаться и в другом случае. При исследовании корональных спектров выявлено более сотни дней наблюдений, на спектрах которых одновременно видно корональную линию  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  и линии излучения триплета Mg ( $\lambda = 5167 \text{ \AA}$ ,  $\lambda = 5173 \text{ \AA}$ ,  $\lambda = 5184 \text{ \AA}$ ), Fe ( $\lambda = 5169 \text{ \AA}$ ,  $\lambda = 5270 \text{ \AA}$ ), а также другие, близлежащие хромосферные линии. М.Н. Гневышев такое явление назвал импульсами корональной активности. Эти импульсы корональной активности сопровождаются эруптивными протуберанцами такими, как “серджи” (*англ.* surges), в которых наблюдаются быстрые изменения и интенсивное движение, большинство из них связаны со вспышками. Для примера мы показали такой спектр излучения в нескольких линиях за 30.X.2014 (рис. 2б). За более ранний период такое импульсное свечение в линиях было представлено в работе [20], где за 22-й цикл СА зафиксировано четыре таких наблюдения. Такие транзитные события на Солнце редкие и трудноуловимые, они характеризуются широким диапазоном пространственных и временных масштабов – от эруптивных протуберанцев до масштабов коро-



**Рис. 1.** Изменение интенсивности корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  (Fe XIV) за 24-й цикл СА. Тонкой линией показаны ежедневные значения  $I_{5303}$  (абс. ед.) усредненные по всему лимбу, а толстой линией — их среднемесячные значения.

нальных выбросов масс (*англ.* Coronal Mass Ejection – CME).

## МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЗЕЛЕННОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ЛИНИИ

### *Каталоги ежедневных корональных карт*

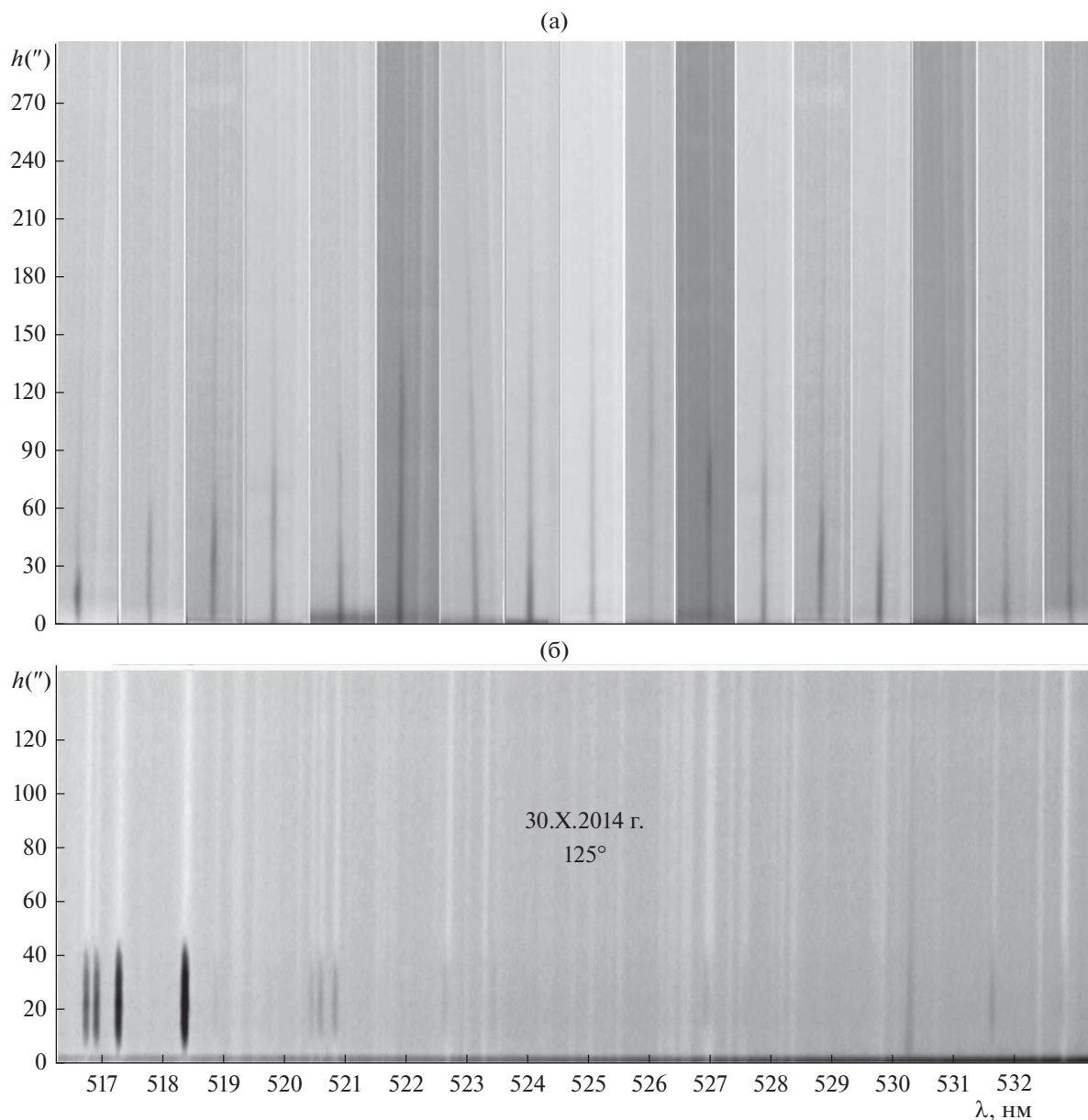
С помощью пакета IDL6.1 (*англ.* Interactive Data Language) была создана компьютерная программа для обработки спектральных корональных данных зеленой линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ . Вычисления  $I_{5303}$  проводились от лимба, начиная с высоты  $h = 2''$  и с шагом  $2.5''$  вдоль линии до конца кадра. Высота спектра на кадрах в зависимости от позиционного угла меняется от  $320''$  до  $400''$ . Кадры с наименьшей высотой спектра охватывают лишь полярные широты Солнца. В результате обработки внезатменных корональных наблюдений создана база данных трех видов ежедневных корональных карт с  $I_{5303}$  на высоте от  $1R_{\odot}$  до  $1.32R_{\odot}$ :

- карты с нанесенными изолиниями значений  $I_{5303}$  на разной высоте от лимба Солнца (рис. 3а);
- карты изменения с высотой значений  $I_{5303}$  в виде градации серого (рис. 3б);
- 3D-карты интенсивности спектральной короны на определенной высоте.

На этих картах нанесены значения  $I_{5303}$  за все дни, которые наблюдались в данном полуобороте Солнца. Для сравнения представлены 3D-карты

интенсивности спектральной короны на высоте  $h = 40''$  (рис. 3в).

На рис. 3 показаны примеры ежедневных корональных карт на ветви подъема, в максимуме и на ветви спада 24-го цикла СА, где подобраны дни с разной конфигурацией спектральной короны. Для наглядности разные виды карт показаны для одного и того же дня. На данных картах видно, что в большинстве случаев до  $h = 30''$  изолинии  $I_{5303}$  могут менять свою конфигурацию, а далее постепенно спадать с высотой. Неоднородности вдоль линии хорошо видны на картах рис. 3б. Также наблюдается смещение максимума изолиний  $I_{5303}$  (рис. 3а), например, на карте за 5.I.2010 в NE (*англ.* Northeast) квадранте, до  $h (80-90)''$  максимум ближе к экватору, а на высоте  $h > 90''$  — он на  $10^{\circ}$  отклоняется к полюсу. В зависимости от фазы цикла СА, как и для корональных лучей в белом свете [21], полученных на широкоугольном коронографе LASCO C2 (*англ.* Large Angle and Spectrometric Coronagraph) космической обсерватории SOHO (*англ.* Solar and Heliospheric Observatory), так и максимумы интенсивности спектральной линии  $5303 \text{ \AA}$  на разных высотах находящиеся над АО (“зеленые лучи”) имеют систематическое отклонение в направлении более высоких или более низких широт. Таким образом, построенные карты наглядно показывают отклонение зеленого луча с высотой от радиального направления, но больших углов наклона до  $25^{\circ}-35^{\circ}$ , как для корональных лучей [21] из-за небольшой



**Рис. 2.** Примеры неоднородной корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  по высоте над активными областями около лимба (а). Пример спектра с излучением в корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ , триплета Mg, и в других линиях, где  $125^\circ$  – позиционный угол (б).

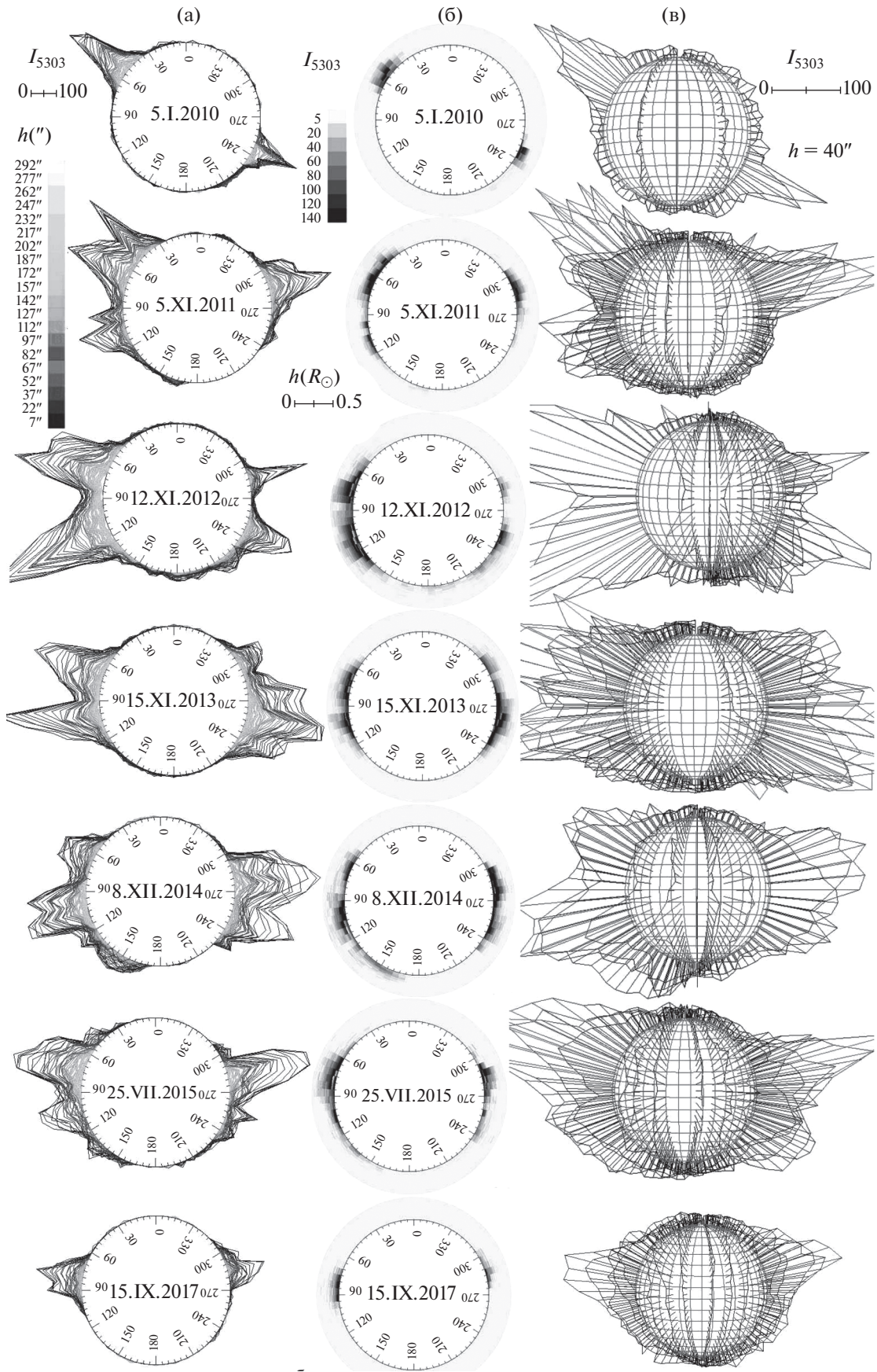
высоты не наблюдаются. Внеатмосферный коронограф LASCO C2 дает изображение лучей, простирающихся до  $6R_\odot$ , но не позволяет наблюдать корону ниже  $2.1R_\odot$ , поскольку построен по схеме коронографа с внешним затмевающим диском, экранирующим области внутренней короны.

Анализ каталогов ежедневных корональных карт показал, что в начале 24-го цикла СА значения  $I_{5303}$  преобладают в северном полушарии Солнца, имеет место асимметрия появления АО в пользу северного полушария. Такая же асимметрия наблюдается в площадях солнечных пятен (<http://solarstation.ru>).

#### *Протяженность корональной линии*

За 24-й цикл СА рассматривались изменения протяженности корональной линии от позиционного угла Солнца. Протяженность линии вычислялась с учетом ореола за данный день. Максимальные значения средней протяженности корональной линии по всему лимбу, приходится на период 2012–2014 гг. (рис. 4а).

Для учета уровня активности различных широтных областей солнечный лимб был разбит на следующие зоны: 1-я – экваториальная:  $\pm 30^\circ$  от экватора; 2-я – средние широты: от  $\pm 30^\circ$  до  $\pm 60^\circ$ ; 3-я – полярная:  $30^\circ$  от полюсов Солнца. Над ак-



← **Рис. 3.** Примеры ежедневных корональных карт спектральной короны с  $I_{5303}$  на высоте  $h(1-1.32)R_{\odot}$ : (а) карты с нанесенными изолиниями значений  $I_{5303}$  на разной высоте от лимба Солнца; (б) карты изменения значений  $I_{5303}$  с высотой в виде градиации серого (в инверсии); (в) 3D-карты интенсивности  $I_{5303}$  спектральной короны на определенной высоте, где  $h = 40$  угл. с.

тивными областями (1-я зона) корональная линия достигает своей максимальной высоты в 2013–2014 гг. Над средними широтами (2-я зона) высота линии имеет максимум в 2012–2013 гг. (рис. 4б). Причем в полярных областях (3-я зона) излучение корональной линии достигает своей максимальной высоты с конца 2012 г. до начала 2013 г., а второй максимум – в конце 2014 г. (рис. 4б). Такое распределение протяженности линии вероятно связано с переполусовкой магнитного поля Солнца. По синоптическим H $\alpha$ -картам, которые были построены М.П. Фатьяновым на ГАС ГАО РАН (<http://solarstation.ru>), переполусовка в северном полушарии Солнца началась в ноябре 2012 г., а закончилась в июне 2013 г., и до сентября 2014 г. на обоих полюсах Солнца была положительная полярность. С сентября до декабря 2014 г. процесс переполусовки происходил на южном полюсе Солнца. Для более детального рассмотрения этих моментов была построена широтно-временная диаграмма протяженности корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  (рис. 4в). В полярной зоне корональная активность длится порядка одного года. Также мы хорошо видим на рис. 4б, что в начале цикла корональная активность средних широт достаточно высокая, а в конце цикла сильно преобладает корональная активность экваториальных широт. Это согласуется с законом Шпёра для пятен.

*Изменение интенсивности линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  с высотой*

Для учета вариации  $I_{5303}$  от уровня активности данной области отдельно для экваториальных, средних и полярных широт Солнца были построены графики изменения интенсивности линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  с высотой. Усредненные за весь 24-й цикл эти кривые показаны на рис. 5а. Для более детального исследования проводилось вычисление  $I_{5303}$  с высотой отдельно для фазы подъема, максимума, фазы спада, и для минимума СА (рис. 5б).

Аппроксимирующие кривые для экваториальной зоны имеют следующий вид:

$$I_{24\text{цикл}} = 57.9 - 0.7h + h^2 - 4 \cdot 10^{-6}h^3; \quad \sigma = 31, \quad (1)$$

$$I_{\uparrow} = 59.3 - 0.7h + h^2 - 4.3 \cdot 10^{-6}h^3; \quad \sigma = 17.9, \quad (2)$$

$$I_{\text{max}} = 73.4 - 0.9h + h^2 - 5.8 \cdot 10^{-6}h^3; \quad \sigma = 13.4, \quad (3)$$

$$I_{\downarrow} = 51 - 0.6h + h^2 - 3.7 \cdot 10^{-6}h^3; \quad \sigma = 21.3, \quad (4)$$

$$I_{\text{min}} = 20.2 - 0.2h + h^2 - 9.7 \cdot 10^{-7}h^3; \quad \sigma = 8.5, \quad (5)$$

где  $I_{24\text{цикл}}$  – интенсивность линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ , усредненная за весь 24-й цикл СА;  $I_{\uparrow}$  – значения интенсивности  $I_{5303}$  на ветви подъема СА;  $I_{\text{max}}$  – интенсивность линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  в максимуме СА;  $I_{\downarrow}$  – значения интенсивности  $I_{5303}$  на ветви спада СА;  $I_{\text{min}}$  –  $I_{5303}$  в минимуме СА;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение.

Самые высокие значения  $I_{5303}$  по всем высотам  $h$  и более крутой спад имеет кривая  $I_{\text{max}}$ , где при рассмотрении по годам наибольшие значения  $I_{5303}$  были в 2012 г. по сравнению с 2013 и 2014 гг. Ветвь подъема цикла активности ( $I_{\uparrow}$ ) имеет больший градиент по высоте, чем ветвь спада ( $I_{\downarrow}$ ), кривая  $I_{\uparrow}$  выше, чем  $I_{\downarrow}$ . А кривая  $I_{\text{min}}$  имеет интересную особенность на больших высотах. На  $h = 120''$  она пересекает кривую  $I_{\downarrow}$  и далее идет выше этой кривой, а с высоты  $h = 180''$  кривая  $I_{\text{min}}$  даже совпадает с кривой  $I_{\uparrow}$ .

Аппроксимирующая кривая для средних широт:

$$I_{24\text{цикл}} = 15.4 - 0.1h + h^2 - 5.2 \cdot 10^{-7}h^3, \quad \sigma = 3.9, \quad (6)$$

$$I_{\uparrow} = 16.6 - 0.1h + h^2 - 3.2 \cdot 10^{-7}h^3, \quad \sigma = 5.5, \quad (7)$$

$$I_{\text{max}} = 19 - 0.2h + h^2 - 9.6 \cdot 10^{-7}h^3, \quad \sigma = 5.7, \quad (8)$$

$$I_{\downarrow} = 11.5 - 0.1h + h^2 - 3.9 \cdot 10^{-7}h^3, \quad \sigma = 6.5, \quad (9)$$

$$I_{\text{min}} = 4.9 - 0.1h + h^2 - 1.2 \cdot 10^{-7}h^3, \quad \sigma = 5.3. \quad (10)$$

Для кривых 2-й зоны наблюдается максимальное значение  $I_{5303}$  на малых высотах на фазе максимума ( $I_{\text{max}}$ ) и с небольшой разницей на фазе подъема ( $I_{\uparrow}$ ). Кривая для фазы подъема СА ( $I_{\uparrow}$ ) до  $h = 150''$  имеет большие значения  $I_{5303}$  и крутой спад, по сравнению с кривой на фазе спада СА ( $I_{\downarrow}$ ).

Для полярных зон:

$$I_{24\text{цикл}} = 6.7 + 1.5\lg(h) - 1.3\lg^2(h), \quad \sigma = 2.3, \quad (11)$$

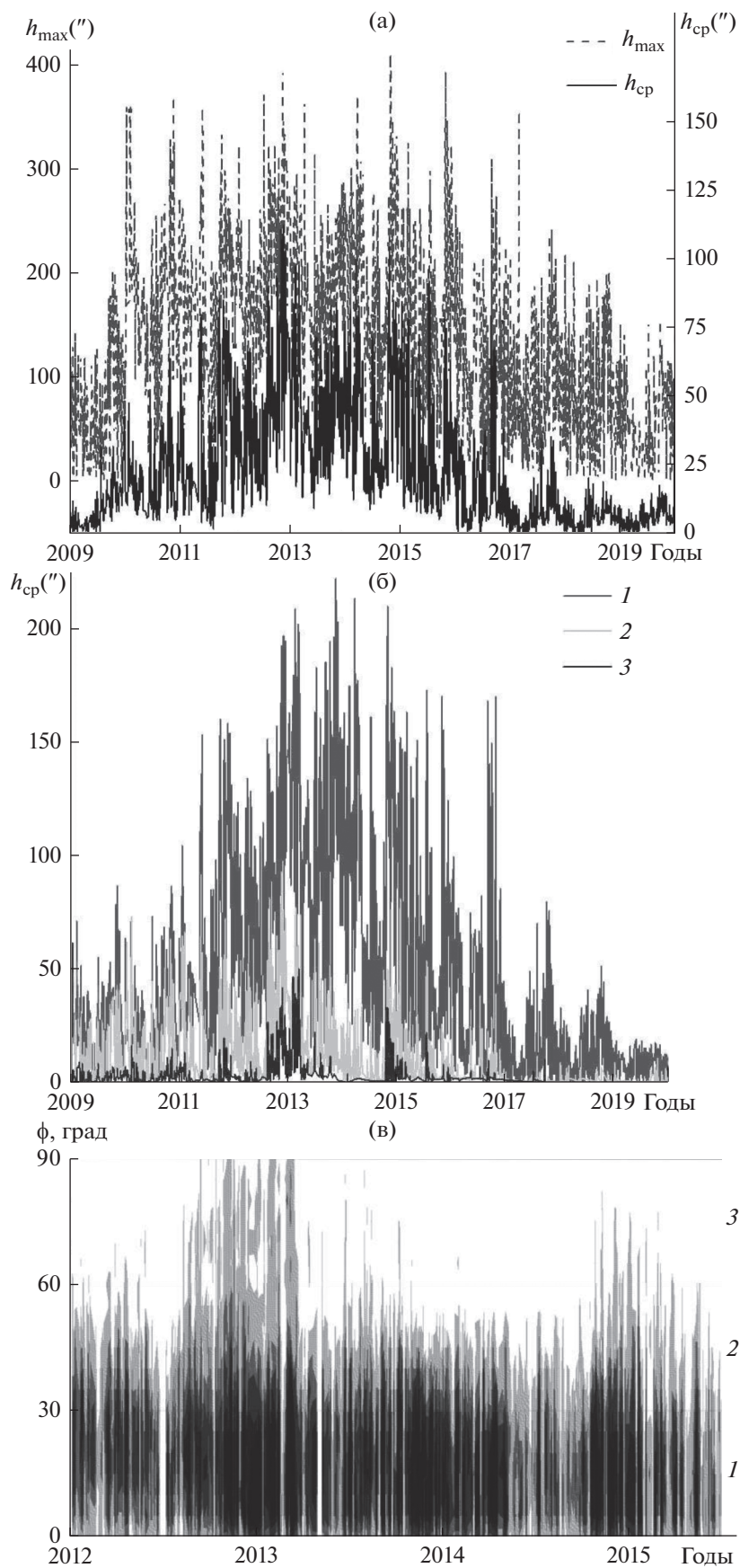
$$I_{\uparrow} = 6.5 + 1.5\lg(h) - 1.2\lg^2(h), \quad \sigma = 5.5, \quad (12)$$

$$I_{\text{max}} = 7.3 + 2\lg(h) - 1.6\lg^2(h), \quad \sigma = 2.6, \quad (13)$$

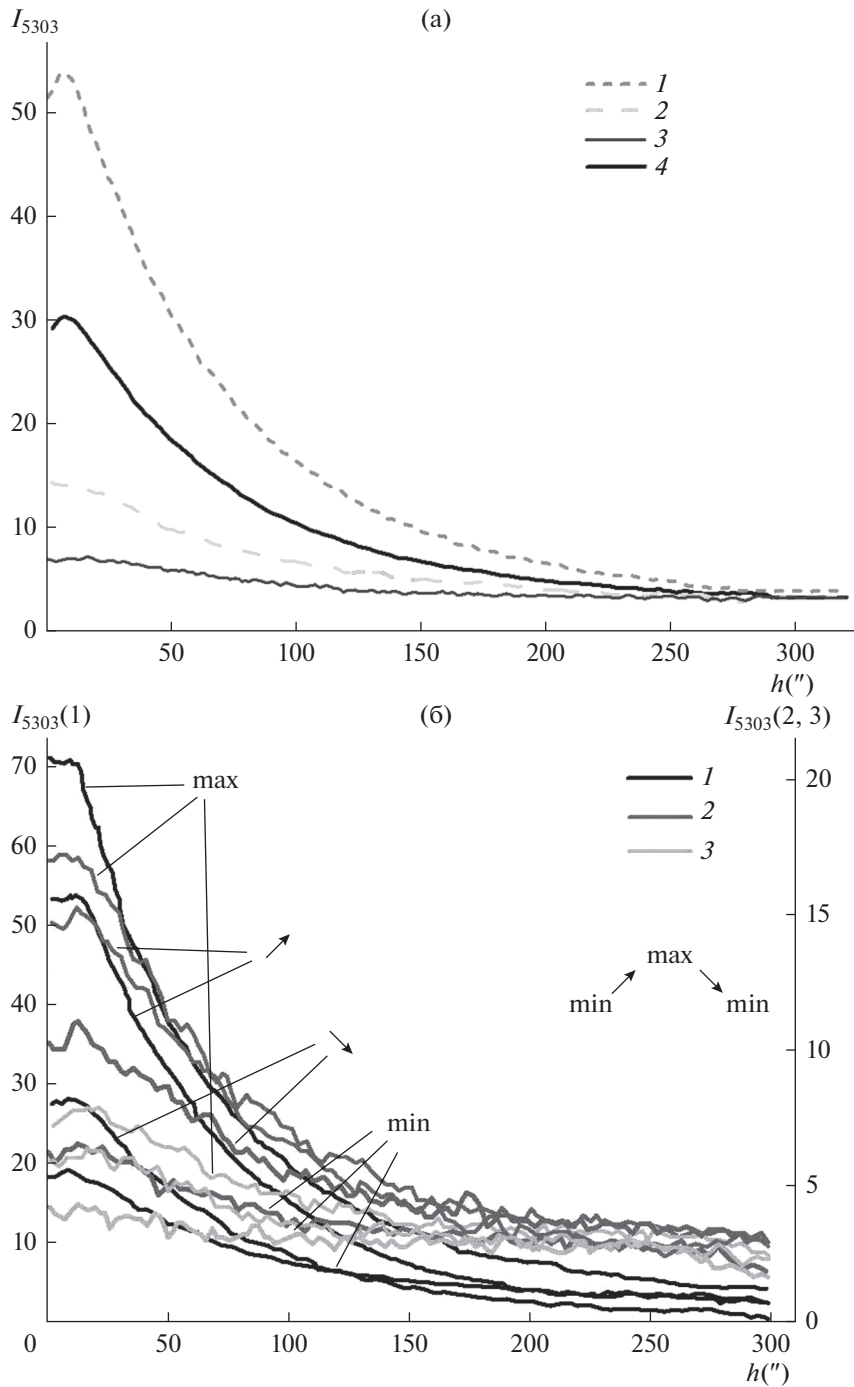
$$I_{\downarrow} = 4.5 + 1.1\lg(h) - 0.7\lg^2(h), \quad \sigma = 6.5, \quad (14)$$

$$I_{\text{min}} = 3.9 - 0.5\lg(h) + 0.1\lg^2(h), \quad \sigma = 3.4. \quad (15)$$

Для полярных зон наибольшие значения интенсивности на высотах до  $h = 150''$  наблюдаются на кривой  $I_{\text{max}}$ , где при рассмотрении по годам имеет место два *одинаковых* максимума: в 2012 и в



**Рис. 4.** Временное распределение значения протяженности корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  (Fe XIV) за 24-й цикл СА: (а) изменение максимальной  $h_{\text{max}}$  и средней  $h_{\text{cp}}$  протяженности зеленой линии по всему лимбу; (б) изменение средней протяженности  $h_{\text{cp}}$  линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  над определенными широтными зонами СА: 1 – экваториальные широты; 2 – средние; 3 – полярные; (в) широтно-временное распределение максимальной  $h_{\text{max}}$  протяженности зеленой линии для фазы максимума СА.



**Рис. 5.** Изменение с высотой интенсивности линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  за 24-й цикл СА: (а) распределение  $I_{5303}$  с высотой для разных широт солнечного лимба: 1 – экваториальных; 2 – средних; 3 – полярных; 4 – все широты; (б) изменения  $I_{5303}$  с высотой  $h$  отдельно для ветви подъема ( $\uparrow$ ) и спада ( $\downarrow$ ) СА, максимальной (max) и минимальной (min) фазы СА.



2014 г. Кривые на фазе подъема ( $I_{\uparrow}$ ) и спада СА ( $I_{\downarrow}$ ) мало чем отличаются, и они почти совпадают с кривой  $I_{\min}$ , построенной для средних широт в минимуме СА.

Уравнение средней аппроксимирующей кривой за весь 24-й цикл СА по всему лимбу следующее:

$$I_{\text{вс}} = 32 - 0.3h + h^2 - 2 \cdot 10^{-6}h^3, \quad \sigma = 15. \quad (16)$$

Усредненные значения  $I_{5303}$  по всем широтам в 24-м цикле, если рассматривать по годам, имеют максимум в 2014 г.

На ветви спада 23-го цикла СА [16], исследование интенсивности линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  от фотосферы Солнца показало, что для спокойных (при отсутствии в этом районе лимба АО ближе, чем на  $30^\circ$ ) и полярных областей, средняя кривая зависимости  $I_{5303}$  от высоты имеет крутой спад до  $h \approx 30''$ . И для активных областей лимба спад интенсивности длится до  $h \approx 120'' - 170''$ . В 24-м цикле СА имеет место крутой спад кривой  $I_{5303}$  до высоты  $h \approx 110''$  для активных областей (1-я зона) на ветви спада и в минимуме СА, а для фазы максимума и на ветви подъема изменение интенсивности  $I_{5303}$  с наибольшей скоростью длится до  $h \approx 130'' - 180''$ . Для средних широт (2-я зона) продолжительность резкого спада кривой меньше. Этот спад кривой для всех фаз цикла, кроме минимума СА, длится до  $h \approx 110'' - 120''$ . Минимальная фаза 2-й зоны и полярные области (3-я зона) на всех фазах имеют спад кривых  $I_{5303}$  до  $h \approx 70'' - 80''$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Зеленая корональная линия — наиболее яркая из всех 35 линий корональной эмиссии в видимой части электромагнитного спектра. Переход корональных наблюдений ГАС ГАО с фотопленочной регистрации на цифровую дал возможность применять цифровые методы обработки изображений, что позволило более подробно изучать структуру корональных спектральных линий [17]. В результате исследования эмиссионной корональной линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  (Fe XIV) за период 24-го цикла СА показано, что эта линия по высоте имеет неоднородную структуру, которая сильно зависит от присутствия близлежащих АО. Построенные каталоги трех видов ежедневных корональных карт хорошо дополняют друг друга для изучения распределения  $I_{5303}$  с высотой, они наглядно показывают смещение максимумов  $I_{5303}$  по позиционному углу от высоты (угол наклона зеленого луча). Мы планируем, более детально исследовать наклон зеленого луча в следующей работе. Проведенный анализ протяженности корональной линии на разных фазах СА показал, что в 1-й зоне максимальная протяженность линии ( $h_{\max}$ ) во всех фазах цикла превышает протяженность ли-

нии во 2-й и 3-й зонах. Временное распределение средней протяженности линии ( $h_{\text{ср}}$ ) в полярных областях имеет хорошо выраженные два максимума, совпадающих с моментами переполусовки на Солнце.

Представлено полученное распределение интенсивности линии  $\lambda = 5303 \text{ \AA}$  с высотой для разных фаз СА. Аппроксимирующими кривыми для экваториальных и средних широт определены полиномиальные уравнения 3-го порядка, а для полярных областей определено логарифмическое уравнение. Кривые изменения  $I_{5303}$  с высотой для экваториальной зоны на всех фазах 24-го цикла СА, имеют наибольший градиент по высоте по сравнению с кривыми для других зон. Кривые изменения  $I_{5303}$  с высотой для полярных широт имеют в 2012 и в 2014 г. наибольшие значения  $I_{5303}$  на высотах до  $h = 150''$ . Это показывает, что процесс переполусовки магнитного поля Солнца отразился и на кривых изменения  $I_{5303}$  с высотой также как и на распределении протяженности линии  $h_{\text{ср}}$ .

В экваториальных широтах наблюдается эффект превышения значений интенсивности на фазе минимума СА ( $I_{\min}$ ) над значениями интенсивности на фазе спада ( $I_{\downarrow}$ ) на больших высотах ( $h > 120''$ ), а на высотах  $h > 180''$  эта кривая интенсивности ( $I_{\min}$ ) имеет одинаковые значения  $I_{5303}$  с кривой на фазе подъема СА ( $I_{\uparrow}$ ). Это говорит о том, что экваториальная корона в минимуме активности на высоте больше 100 000 км излучает ярче, чем на ветви спада СА и ее излучение совпадает с яркостью короны на ветви подъема СА.

Ранее авторами были получены логарифмические функции высотных трендов  $I_{5303}$  для разных широтных зон на фазе спада 23-го цикла СА [11, 16]. За тот небольшой временной период почти не встречались корональные линии с явными неоднородностями. Мы считаем полезным, продолжить данную работу для исследования красной корональной линии  $\lambda = 6374 \text{ \AA}$  (Fe X) за цикл СА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lyot B.* La couronne solaire étudiée en dehors des éclipses // Comptes rendus de l'Académie des Sciences. 1930. V. 191. P. 834–837.
2. *Edlén B.* Die Deutung der Emissionslinien in Spektrum der Sonnenkorona // Z. Astrophysik. 1943. V. 22. P. 30–64.
3. *Waldmeier M.* Die Sonnenkorona. Basel: Birkhäuser, 1957. V. 2. 353 p.
4. *Гневышев М.Н., Гневышева Р.С.* Начало регулярных наблюдений солнечной короны вне затмений // Бюл. Комиссии по исследованию Солнца. 1954. № 10. С. 60–62.
5. *Шкловский И.С.* Физика солнечной короны. 2-е изд. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. 516 с.

6. *Fisher R.R.*  $\lambda$  5303 Fe XIV density models of the inner solar corona // *Solar Physics*. 1978. V. 57. № 1. P. 119–128.
7. *Okamoto T.* Latitude distribution of the green corona for the period 1951–1985 // *Tokyo Astronomical Observatory Reprints*. 1986. V. 20. № 4. P. 547–551.
8. *Sakurai T., Irie M., Imai H., Miyazaki H., Sykora J.* Emission line intensities of the solar corona and sky brightness observed at Norikura: 1950–1997 // *Publ. National Astronomical Observatory, Japan*. 1999. V. 5. P. 121–137.
9. *Rybanský M., Minarovjech M., Rušin V.* Evolution of the green corona in 1996–2002 // *Solar Physics*. 2003. V. 217. P. 109–118.
10. *Rušin V., Rybanský M., Minarovjech M.* The 530.3 nm corona irradiance from 1939 to 2001 // *Advances in Space Research*. 2004. V. 34. P. 251–257.
11. *Гусева С.А.* Долговременные циклические изменения структуры солнечной короны: дис. канд. физ.-мат. наук. СПб., 2013. 156 с.
12. *Rušin V.* The Height Gradient of the Coronal Emission Line 5303 Å // *Bull. Astronomical Inst. Czech Academy of Sciences*. 1973. V. 24. № 3. P. 121–129.
13. *Тягун Н.Ф.* Исследования взаимосвязи полуширина – интенсивность для линий излучения короны Fe XIV 5303, Fe XVI 6374 и Ca XV 8544 в зависимости от высоты // *Солнечно-земная физика*. 2004. № 6. С. 104–105.
14. *Singh J., Ichimoto K., Imai H., Sakurai T., Takeda A.* Spectroscopic Studies of the solar corona I. Spatial variations in line parameters of green and red coronal lines // *Publ. Astronomical Soc. Japan*. 1999. V. 51. P. 269–273.
15. *Singh J., Sakurai T., Ichimoto K., Suematsa Y., Takeda A.* Spectroscopic Studies of the Solar Corona II. Properties of Green and Red Emission Lines in Open and Closed Coronal Structure // *Publ. Astronomical Soc., Japan*. 2002. V. 54. P. 793–806.
16. *Гусева С.А., Шрамко А.Д.* Исследование корональной линии 5303 Å на разной высоте от лимба Солнца в период спада солнечной активности // *Тр. конф. “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений”*. ГАО РАН. СПб., 2007. С. 131–134.
17. *Guseva S.A.* Continuous 60-Year Observations of the Spectral Solar Corona at the Mountain Astronomical Station of Pulkovo Observatory // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2019. V. 59. № 7. P. 864–869.
18. *Гневышев М.Н.* Техника и методика корональных наблюдений // *Бюл. Международный геофизический год*. 1959. С. 36–38.
19. *Costa A., Stenborg G.* Characterization of Intensity Variations Along Fe XIV Coronal Loops — A Case Study // *Solar Physics*. 2004. V. 222. № 2. P. 229–245.
20. *Ким Гун-дер.* Импульсы корональной активности // *Тр. конф. “Солнечная активность как фактор космической погоды”*. ГАО РАН. СПб., 2005. С. 403–404.
21. *Гусева С.А., Фатьянов М.П., Шрамко А.Д.* Конфигурация гелиосферного слоя по синоптическим картам корональных лучей за 23-й, 24-й циклы солнечной активности // *Геоматнезизм и аэрономия*. 2015. Т. 55. № 3. С. 302–309.