

УДК 523.9-355

ИССЛЕДОВАНИЕ КРАСНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ЛИНИИ С ВЫСОТОЙ ПО ВНЕЗАТМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА 24-Й СОЛНЕЧНЫЙ ЦИКЛ

© 2025 г. С. А. Гусева*, А. Д. Шрамко**

*Горная астрономическая станция**Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, Кисловодск, Россия***e-mail: svgual@yandex.ru****e-mail: a_shramko@inbox.ru*

Поступила в редакцию 14.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 13.03.2024 г.

В статье представлены результаты исследований эмиссионной корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ (FeX) за период 24-го цикла активности Солнца. Спектральные данные получены на внезатменном коронографе системы Лио, установленном на Горной астрономической станции Главной астрономической обсерватории РАН (ГАС ГАО РАН), близ г. Кисловодска. На основе обработки результатов внезатменных наблюдений создана база данных трех видов ежедневных корональных карт с распределением по высоте h от $1 R_{\odot}$ до $1.38 R_{\odot}$ (R_{\odot} – радиус Солнца) значений интенсивности красной линии (I_{6374}). На протяжении всего солнечного цикла найдены спектральные наблюдения, демонстрирующие доплеровский сдвиг вдоль красной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$. Проведены вычисления протяженности красной линии от позиционного угла Солнца. Показано, что максимальное значение средней протяженности корональной линии по всему лимбу приходится на ветвь подъема 24-го цикла солнечной активности. Для разных фаз рассматриваемого солнечного цикла (для ветви подъема, периода максимума, ветви спада и минимума солнечной активности) и для разных областей активности Солнца построены и интерпретированы зависимости изменения с высотой значений I_{6374} . Проведен регрессионный анализ полученных соотношений. Представлены уравнения регрессии. Изменения I_{6374} с высотой для полярных областей (для всех фаз цикла кроме максимума и ветви спада) и для средних широт (для минимума активности) с наибольшей вероятностью имеют логарифмическую зависимость, а аппроксимирующие кривые тренда для остальных широтных зон определяются степенной функцией третьего порядка.

DOI: 10.31857/S0023420625010054, EDN: HEENKD

1. ВВЕДЕНИЕ

Примерно один раз в год и только несколько минут (≤ 7 мин) на Земле можно наблюдать удивительное астрономическое событие – корону Солнца, которая в виде серебристо-жемчужного сияния вспыхивает во время полного солнечного затмения. Научные исследования солнечной короны начались после наблюдения солнечного затмения 8.VII.1842. Позднее для изучения короны Солнца были задействованы фотографические и спектроскопические методы анализа. Наблюдение и изучение солнечной короны является важнейшей задачей в солнечной физике. И благодаря изобретению в 1930 г. французским

астрономом Б. Лио (*фр.* Bernard Lyot) внезатменного коронографа [1], наблюдения короны Солнца стали возможны не только во время редких полных солнечных затмений в узкой полосе местности прохождения полной фазы. Применение коронографа системы Лио позволило швейцарскому астроному М. Вальдмайеру (*англ.* Max Waldmeier) в 1939 г. приступить к систематическим корональным наблюдениям на горе Ароза [2]. В этом же году немецкий астрофизик В. Гротриан (*нем.* Walter Robert Wilhelm Grottrian) доказал принадлежность красной спектральной линии, которую наряду с другими корональными линиями не могли отождествить в течение

70 лет, к сильно ионизированному атому железа — FeX [3] с потенциалом ионизации 233 эВ. Таким образом, было показано, что для генерации излучения в корональных линиях необходимы температуры порядка 10^6 К [4]. Красная линия $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ не такая яркая, как зеленая $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ (FeXIV), и, к сожалению, не все обсерватории включали в свои программы наблюдений эту линию. Непрерывные наблюдения линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ проводились в следующих обсерваториях: в Швейцарии (1939 г.) — Ароза (*нем.* Arosa), во Франции (1947 г.) — Пик-дю-Миди (*фр.* Pic du Midi), в США (1949 г.) — Сакраменто Пик (*англ.* Sacramento Peak), в СССР (1952 г.) — ГАС ГАО РАН [5], в Чехословакии (1964 г.) — Ломницки Штит (*словацк.* Lomnický štít). Несмотря на то, что созданная в XX в. всемирная сеть корональных станций перестала существовать, изучение спектральной короны актуально и сегодня. Солнечная корона — это источник солнечного ветра, и регулярные наблюдения за изменением интенсивности корональной линии по позиционному углу и высоте позволяют более глубоко понять закономерности солнечной активности, ее влияние на космическую погоду. Исследование интенсивности запрещенных корональных линий представляет собой большой интерес для изучения физических процессов, происходящих в атмосфере Солнца, для прогнозирования изменений геомагнитной и солнечной активности (СА). По единой международной методике обработки корональных линий, которая была предложена М. Н. Гневышевым [6], интенсивность линии измеряется на определенной высоте $h = 1.04 R_{\odot}$. Эта методика обработки данных спектральной короны Солнца на ГАС ГАО РАН соблюдается по сей день, а другие обсерватории в последние годы своих наблюдений перестали ее придерживаться. Например, обсерватория Ломницки Штит проводила измерения I_{6374} на $h = 1.06 R_{\odot}$, а Сакраменто Пик — на $h = 1.15 R_{\odot}$. Особенности распределения I_{6374} вдоль лимба на других высотах от фотосферы Солнца не входили в “Службу Солнца”, и поэтому таких работ было меньше особенно за большие периоды времени [7–16]. Часто такие исследования проводили по спектральным данным, полученным во время затмения Солнца [11, 13].

Ранее авторами было проведено исследование радиального распределения корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ в период минимума СА [17]. За 2009 г. были получены кривые изменения интенсивности красной линии на разной высоте от лимба Солнца для полярных, среднеширотных

и экваториальных областей. Работа была продолжена для целого солнечного цикла.

Цель настоящей работы — исследование изменения параметров корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ с высотой от $1 R_{\odot}$ до $1.38 R_{\odot}$ на большом наблюдательном материале.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В настоящей работе использовались спектральные данные красной корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ (FeX), полученные за период 24-го цикла СА на внезатменном коронографе системы Лио ГАС ГАО РАН [18]. За данный период (2010–2019 гг.) в среднем за год корональных наблюдений было 180 дней. Надо отметить, что в 24-м цикле СА было наибольшее число дней корональных наблюдений по сравнению с другими циклами СА [18]. Для фотографирования спектра короны использовались цифровые камеры Canon EOS 450D и 600D. В результате обработки, в соответствии с 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 \AA непрерывного спектра центра Солнца, которые измеряются на расстоянии $40''$ от фотосферы Солнца [6]. На рис. 1 представлен временной ряд 24-го цикла спектральной короны I_{6374} (абс. ед.) по этим данным. Спектральные наблюдения

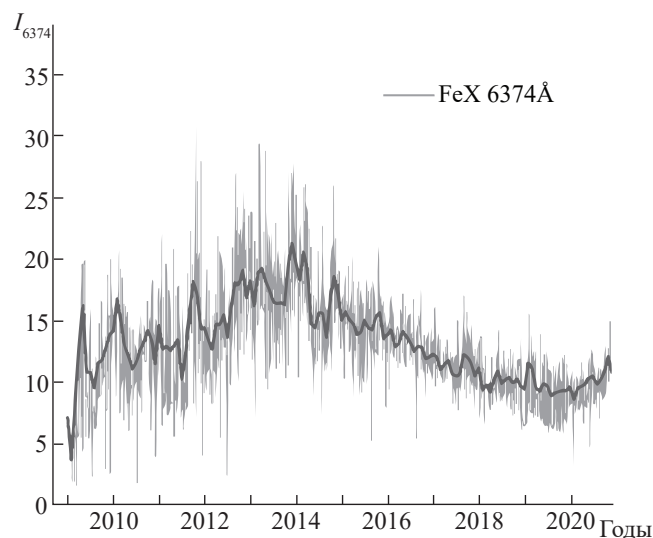


Рис. 1. Изменение интенсивности корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ (FeX) за 24-й цикл СА. Тонкой линией показаны ежедневные значения I_{6374} (абс. ед.) усредненные по всему лимбу, а толстой линией — их среднемесячные значения

Горной астрономической станции ГАО РАН позволяют делать измерения I_{6374} вдоль линии до высоты $6'$ ($1.38 R_{\odot}$).

3. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОРОНАЛЬНЫХ СПЕКТРОВ

За 10 лет было обработано 1822 дней наблюдений красной спектральной короны. Общее количество обработанных кадров составило 131184. Анализ цифровых фотографий показал, что, как и на зеленом участке спектра [19–20], в красном спектре есть дни, где наблюдаются интенсивные излучения в нескольких линиях. М. Н. Гневышев назвал такое явление импульсами корональной активности. Эти импульсы корональной активности сопровождаются эруптивными протуберанцами, такими, как “серджи” (*англ.* surges), в которых наблюдаются быстрые изменения и интенсивные движения. Большинство из них связано со вспышками. На рис. 2а показан спектр излучения такого эруптивного протуберанца в линии $H\alpha$ ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$) и в линии излучения триплета Mg ($\lambda = 5167 \text{ \AA}$, $\lambda = 5173 \text{ \AA}$, $\lambda = 5184 \text{ \AA}$) за 14.III.2014, где зеленый спектр наблюдался в 9:42, а красный – в 9:36 UT. Такие транзитные события на Солнце редки и трудноуловимы, они характеризуются широким диапазоном пространственных и временных масштабов – от эруптивных протуберанцев до масштабов корональных выбросов масс (*англ.* CME – Coronal Mass Ejection). Для примера на рис. 2б показан спектр в красном диапазоне излучения в нескольких линиях за 30.X.2014. Ранее [19] за эту дату был представлен спектр с импульсами корональной активности в зеленом диапазоне длин волн. На рис. 2в зафиксирован редкий момент, когда одновременно видно излучения корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ и хромосферных линий $H\alpha$ ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$), и $BaII$ ($\lambda = 6497 \text{ \AA}$). Во время солнечной вспышки или коронального выброса масс на Солнце происходит интенсивное излучение в широком диапазоне длин волн, включая как видимую область спектра, так и ультрафиолет, рентгеновский и радиодиапазоны. Во время таких транзитных событий на Солнце, спектральные линии могут иметь различную интенсивность и профиль, поэтому их параметры и свойства могут изменяться в зависимости от характеристик и интенсивности вспышки или выброса. Корональная линия $\lambda = 6374 \text{ \AA}$, как и линия $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ [19] во время излучения таких импульсов корональной активности имеет неоднородную структуру вдоль линии (рис. 2а,б).

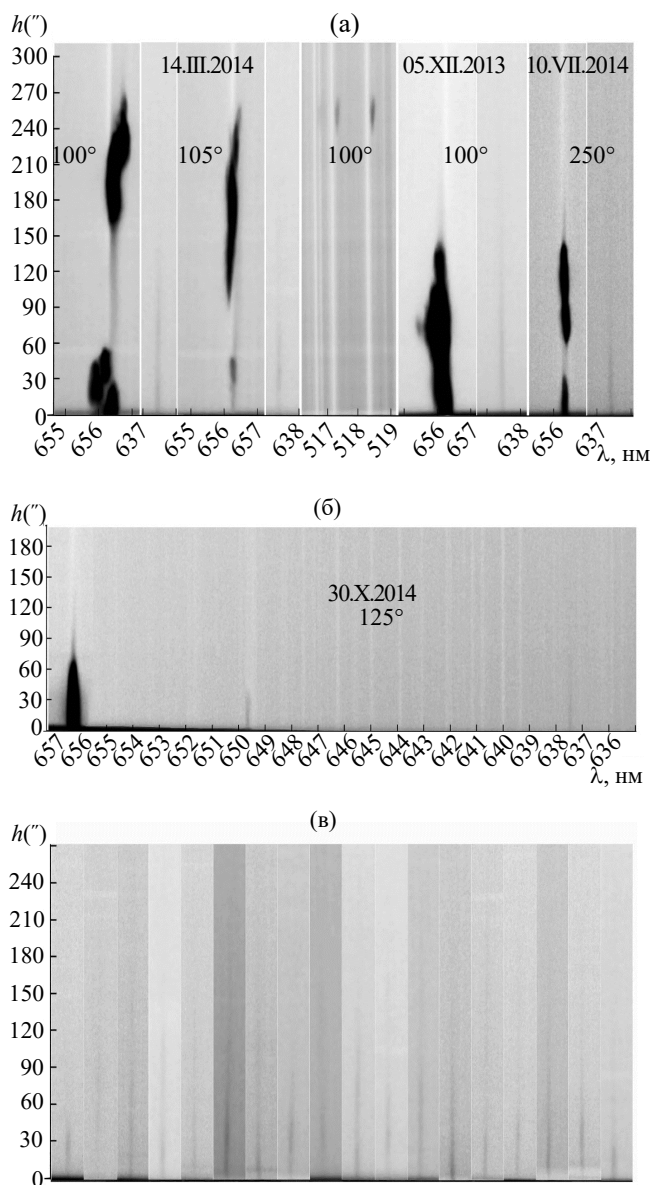


Рис. 2. Панель (а) – примеры неоднородной корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ во время излучения эруптивного протуберанца типа “серджа” в линии $H\alpha$ ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$) и в линии излучения триплета Mg ($\lambda = 5167 \text{ \AA}$, $\lambda = 5173 \text{ \AA}$, $\lambda = 5184 \text{ \AA}$). Указана дата и позиционный угол; панель (б) – пример спектра с излучением в корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$, $H\alpha$ ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$) и Ba ($\lambda = 6497 \text{ \AA}$), где 125° – позиционный угол; панель (в) – примеры неоднородностей вдоль корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ над активными областями около лимба

Неоднородная структура вдоль красной линии наблюдается чаще, чем в зеленой линии (рис. 2в). В отличие от зеленой линии, где присутствуют несколько ярких сгустков, которые напоминают зерна, нанизанные на эту линию [19], вдоль красной линии неоднородности имеют другой вид. У основания красная линия яркая и широкая,

а затем резко теряет интенсивность. Она может расширяться еще больше. Имеет место сильная асимметрия линии, наблюдаются сдвиги в одну и в другую сторону вдоль линии, такие доплеровские смещения линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ были получены и описаны автором во время наблюдения солнечного затмения 29.III.2006 [11]. Полученные во время затмения спектральные кадры красной линии наблюдались над активной областью, где высота спектра на одном кадре охватывала область от $1 R_{\odot}$ до $1.5 R_{\odot}$, а на другом кадре от $1.02 R_{\odot}$ до $1.86 R_{\odot}$ от видимого центра Солнца. Когда группа пятен находится на лимбе Солнца, в середине красной корональной линии может присутствовать относительно большой яркий сгусток. Или аналогично, как для зеленой линии, несколько ярких сгустков, но они не явно выраженные, таких наблюдений меньше, чем в зеленом спектре [19]. По-видимому, неоднородности вдоль красной и зеленой линий имеют разную природу. Излучение красной спектральной короны происходит преимущественно в областях с открытыми структурами магнитного поля (МП), а зеленая корона в линии $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ излучается структурами, в которых доминируют активные области и связанные с ними закрытые конфигурации МП (корональные петли), и отвечает за более горячую плазму [7–9]. Красная линия $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ излучается из более холодной плазмы, которая присутствует практически во всей солнечной короне, включая корональные дыры.

4. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ КРАСНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ЛИНИИ

Каталоги ежедневных корональных карт

С помощью пакета IDL6.1 (*англ.* Interactive Data Language) была написана компьютерная программа для обработки спектральных корональных данных красной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$. Вычисления I_{6374} 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 $500''$. Кадры с наименьшей высотой спектра охватывают лишь полярные широты Солнца. В результате обработки внезатменных корональных наблюдений была создана база данных трех видов ежедневных корональных карт с I_{6374} на высоте от $1 R_{\odot}$ до $1.32 R_{\odot}$:

– карты с нанесенными изолиниями значений I_{6374} на разной высоте от лимба Солнца (рис. 3а);

– карты изменения с высотой значений I_{6374} в виде градации серого (рис. 3б);

– 3D-карты I_{6374} на определенной высоте (рис. 3в). На этих 3D-картах нанесены значения I_{6374} 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 (рис. 3а) видно, что в большинстве случаев до высоты $h = 70''$ изолинии I_{6374} могут менять свою конфигурацию с высотой. Чем меньше высота, тем больше хаотичность изолиний. Так же, как и на картах для I_{5303} [19] наблюдается смещение максимума изолиний I_{6374} , но оно не такое отчетливое и встречается реже. Например, на карте за 2.II.2010 в SW (*англ.* Southwest) квадранте до $h = 100''$ максимум хоть и имеет небольшие скачки, но он ближе к полюсу, а затем он на 10° отклоняется к экватору. В работе [21] исследовалось отклонение от радиального направления корональных лучей в белом свете в зависимости от фазы цикла СА, с использованием данных широкоугольного коронографа LASCO C2 (*англ.* Large Angle and Spectrometric Coronagraph) космической обсерватории SOHO (*англ.* Solar and Heliospheric Observatory). Как и для корональных лучей в белом свете, максимумы интенсивности спектральной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ на разных высотах (“красные лучи”) имеют отклонения в направлении более высоких или более низких широт. Таким образом, построенные карты наглядно показывают отклонение “красного луча” с высотой от радиального направления, но больших углов наклона до $25\text{--}35^\circ$, как для корональных лучей в белом свете [21], не наблюдается.

Неоднородности вдоль линии хорошо видны на картах рис. 3б. Анализ каталогов ежедневных корональных карт (рис. 3) показал, что в начале 24-го цикла СА значения I_{6374} , как и для I_{5303} , преобладают в северном полушарии Солнца, то есть имеет место асимметрия появления активных областей (АО) в пользу северного полушария. Такая же асимметрия наблюдается в площадях солнечных пятен (<http://solarstation.ru>).

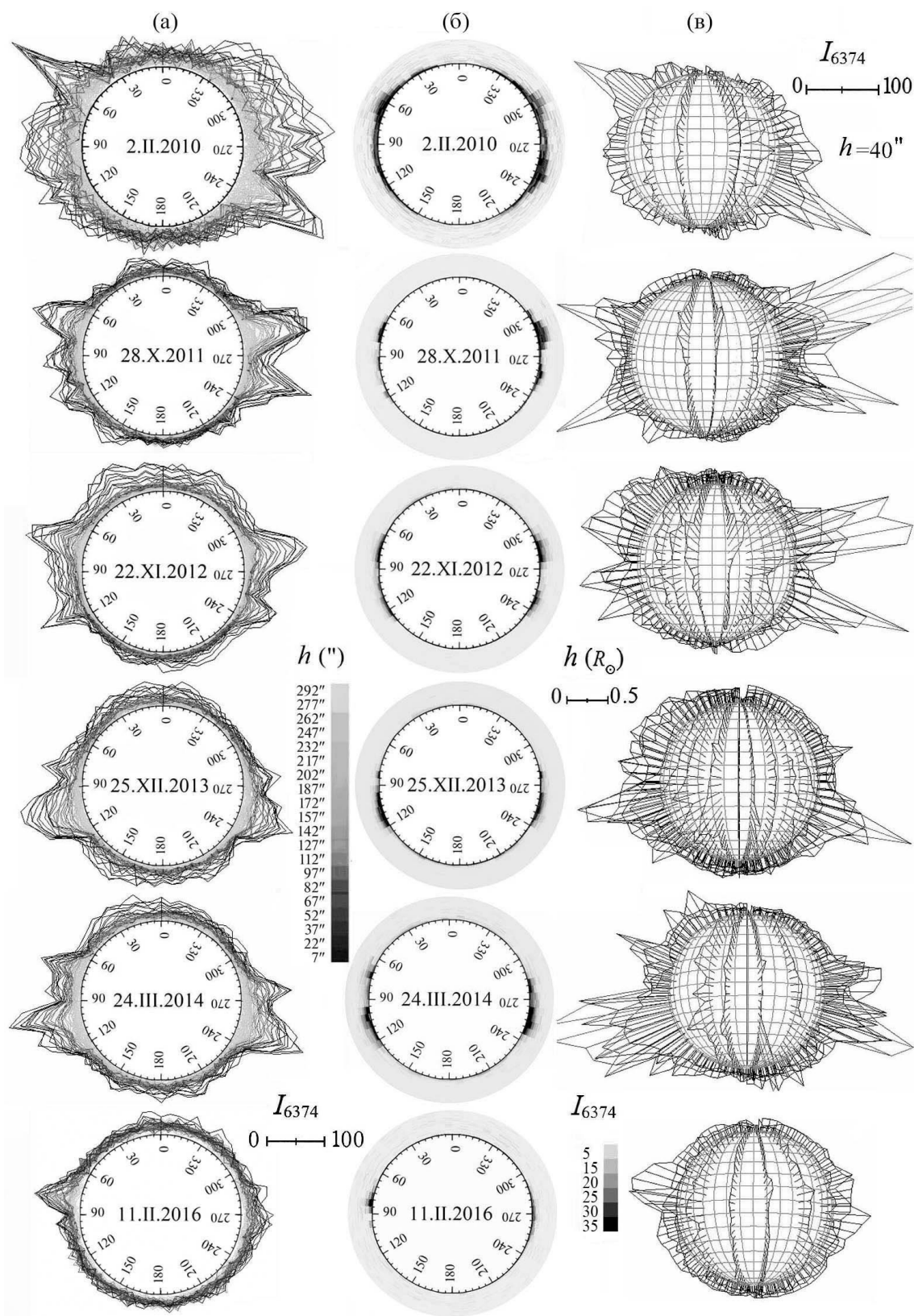


Рис. 3. Примеры ежедневных корональных карт спектральной короны с I_{6374} на высоте h (1–1.32) R_{\odot} : (а) – карты с нанесенными изолиниями значений I_{6374} на разной высоте от лимба Солнца; (б) – карты, отображающие распределение значений I_{6374} с высотой, в виде градации серого (в инверсии); (в) – 3D-карты I_{6374} спектральной короны на определенной высоте, где $h = 40''$

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. Временное распределение значений протяженности линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ (FeX) по всему лимбу за 24-й цикл СА сильно отличается от аналогичного распределения для линии $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ (FeXIV) [19]. Максимальные значения средней протяженности $h_{\text{ср}}$ корональной линии по всему лимбу приходится на период 2010–2011 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° от полюсов Солнца.

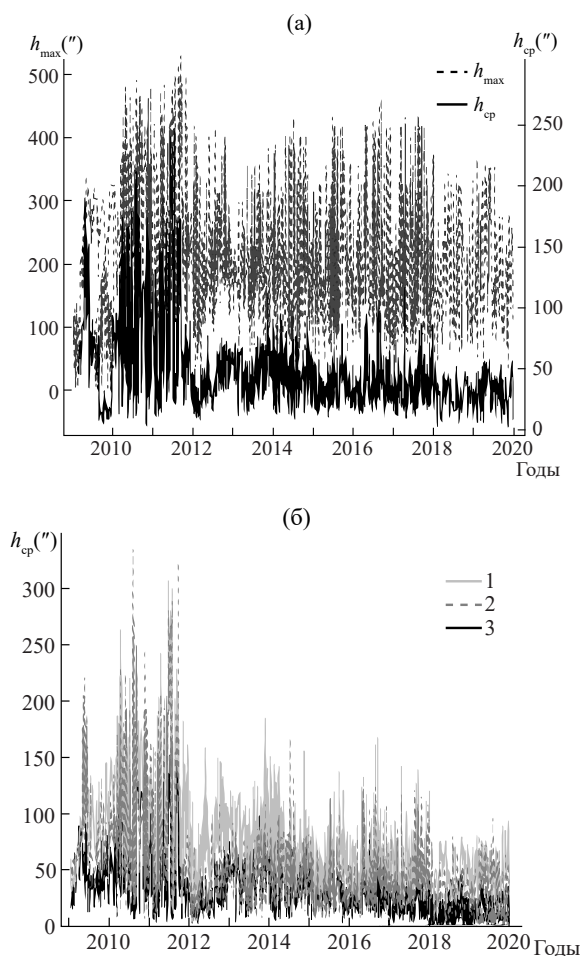


Рис. 4. Графики, показывающие динамику протяженности корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ (FeX) за 24-й цикл СА: (а) – изменения значений максимальной h_{max} и средней $h_{\text{ср}}$ протяженности линии по всему лимбу; (б) – вариации средней протяженности $h_{\text{ср}}$ линии над определенными широтными зонами СА: 1 – экваториальной; 2 – средней; 3 – полярной

Над экваториальными областями (1-я зона) и над средними широтами (2-я зона) корональная линия достигает своей максимальной высоты на фазе подъема солнечного цикла (рис. 4б). На рис. 4б хорошо видно, что в начале цикла корональная активность средних широт доминирует, протяженность линии $h_{\text{ср}}$ 2-й зоны выше, чем $h_{\text{ср}}$ 1-й зоны, а в период максимума преобладает корональная активность экваториальных широт, на ветви спада и до конца цикла протяженность $h_{\text{ср}}$ этих двух зон соизмерима. В полярных областях (3-я зона) излучение корональной линии достигает своей максимальной высоты в период 2010–2011 гг., а второго максимума – в 2013 г. (рис. 4б). Распределение протяженности красной линии в полярных широтах опережает на год широтный дрейф нейтральной линии раздела полярности МП Солнца. По синоптическим На-картам, построенными по данным ГАС ГАО РАН М. П. Фатьяновым (<http://solarstation.ru>), смена полярного МП в северном полушарии Солнца происходила с конца 2012 г. до середины 2013 г. И почти год на обоих полюсах Солнца была положительная полярность. С сентября 2014 г. процесс переполусовки происходил на южном полюсе Солнца. Еще один максимум $h_{\text{ср}}$ для 3-ей зоны наблюдается в середине 2016 г. Таким образом, в полярных областях мы видим активность красной линии в противофазе зеленой линии. При распределении эмиссионной короны по широте в ходе 22-го и 23-го циклов СА наблюдался аналогичный провал в значениях интенсивности красной короны на полюсе сопоставимый с зелёной короной [15]. В период максимума цикла СА флуктуации интенсивности короны в данных линиях имеют противофазное изменение.

Изменение интенсивности линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ с высотой

Для учета вариации I_{6374} от уровня активности данной области отдельно для каждой из трех зон были построены графики распределения интенсивности линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ с высотой. Усредненные за весь 24-й цикл эти кривые показаны на рис. 5а. Для более детального исследования проводилось вычисление I_{6374} с высотой отдельно для фазы подъема, максимума, фазы спада и для минимума СА (рис. 5б).

Аппроксимирующие кривые для 1-й зоны имеют следующий вид:

$$I_{\uparrow} = 26.6 - 0.3h + h^2 - 2 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 10.1, \quad (1)$$

$$I_{\text{max}} = 24.4 - 0.2h + h^2 - 1.7 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 13.5, \quad (2)$$

$$I_{\downarrow} = 21 - 0.2h + h^2 - 1.3 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 6.2, \quad (3)$$

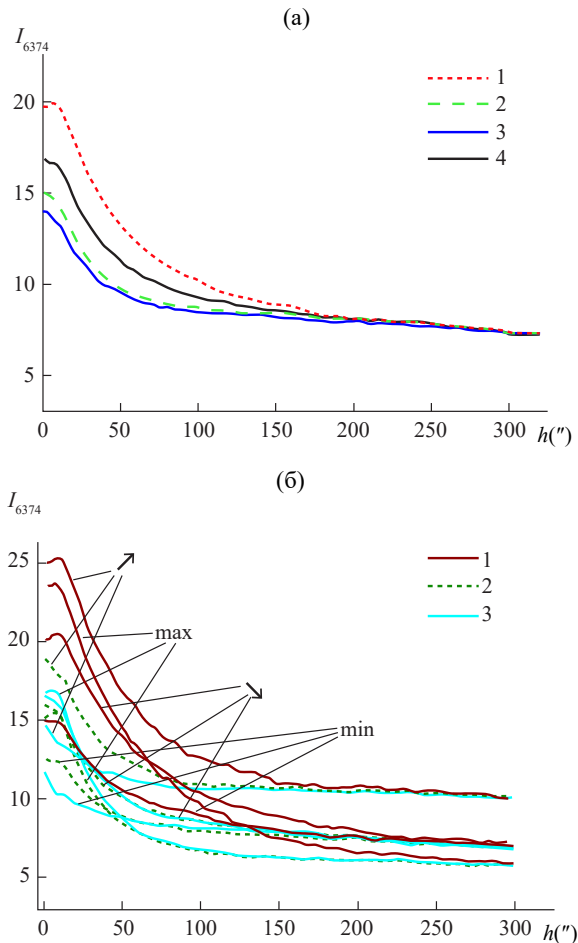


Рис. 5. Изменение с высотой h интенсивности линии $\lambda 6374\text{\AA}$ за 24-й цикл СА: (а) — зависимость I_{6374} для разных широтных зон солнечного лимба: 1 — экваториальной; 2 — средней; 3 — полярной; 4 — всего лимба Солнца; (б) — распределение I_{6374} отдельно для ветви подъема (\nearrow) и спада (\searrow), максимальной (max) и минимальной (min) фаз цикла СА, где цифрами указана широтная зона

$$I_{\min} = 15.2 - 0.1h + h^2 - 9 \cdot 10^{-7}h^3, \sigma = 3.7, \quad (4)$$

где I_{\uparrow} — значения I_{6374} на ветви подъема СА; I_{\max} — интенсивность I_{6374} в максимуме СА; I_{\downarrow} — значения I_{6374} на ветви спада СА; I_{\min} — I_{6374} в минимуме СА; σ — среднеквадратическое отклонение.

Самые высокие значения I_{6374} по всем высотам h имеет кривая на ветви подъема цикла (I_{\uparrow}). В отличие от зеленой линии, где распределение I_{5303} по всем высотам h преобладала кривая I_{\max} [19]. Значения I_{6374} на кривой I_{\uparrow} спадают до $h = 150''$, до этой же высоты изменяется и кривая I_{\min} . А в период максимальной фазы (I_{\max}) кривая I_{6374} имеет самый крутой и продолжительный спад, и на больших высотах $h \geq 130''$ наблюдаются наименьшие значения I_{6374} по сравнению с другими фазами СА. На высоте $h = 70''$ кривая

I_{\downarrow} выше, чем I_{\max} . Ветвь подъема цикла активности (I_{\uparrow}) и ветвь спада (I_{\downarrow}) имеют больший градиент по высоте, чем, кривая I_{\min} . А кривая I_{\min} на больших высотах имеет следующую особенность: на $h = 130''$ она пересекает I_{\max} и далее идет выше нее, а с высоты $h = 220''$ кривая I_{\min} соизмерима с I_{\downarrow} (рис. 5б).

Аппроксимирующие кривые для 2-й зоны:

$$I_{\uparrow} = 18.2 - 0.1h + h^2 - 1.4 \cdot 10^{-7}h^3, \sigma = 9.7, \quad (5)$$

$$I_{\max} = 15.5 - 0.2h + h^2 - 1.8 \cdot 10^{-7}h^3, \sigma = 14.9, \quad (6)$$

$$I_{\downarrow} = 15.6 - 0.1h + h^2 - 1.3 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 8, \quad (7)$$

$$I_{\min} = 14.5 - 3.27Lg(h) + 0.1Lg^2(h), \sigma = 5.4. \quad (8)$$

Для 2-й зоны, как и для 1-й, наибольшие значения I_{6374} характерны для ветви подъема цикла (I_{\uparrow}), как для малых, так и для больших высот. Наименьшие значения I_{6374} наблюдаются на высотах $h > 50''$ в максимуме СА (I_{\max}), кривая I_{\max} лежит даже ниже I_{\min} (рис. 5б).

Аппроксимирующие кривые для 3-ей зоны:

$$I_{\uparrow} = 14.6 - 2.8Lg(h) + 0.4Lg^2(h), \sigma = 3.3, \quad (9)$$

$$I_{\max} = 16.6 - 0.2h + h^2 - 2 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 17.1, \quad (10)$$

$$I_{\downarrow} = 16.2 - 0.2h + h^2 - 1.5 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 9.8, \quad (11)$$

$$I_{\min} = 11.8 - 1.3Lg(h) - 0.2Lg^2(h), \sigma = 1.5. \quad (12)$$

В полярных широтах наибольшие значения I_{6374} на малых высотах ($h < 50''$) соответствуют фазам максимума (I_{\max}) и спада (I_{\downarrow}) цикла СА. А наибольшие значения I_{6374} на высотах $h > 50''$ принадлежат ветви подъема солнечного цикла (I_{\uparrow}).

Уравнения средних аппроксимирующих кривых за 24-й цикл СА:

$$I_{24 \text{ цикл}} = 17.1 - 0.1h + h^2 - 1.3 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 4.3, \quad (13)$$

$$I_1 = 20.8 - 0.2h + h^2 - 1.4 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 5.2, \quad (14)$$

$$I_2 = 14.7 - 0.1h + h^2 - 1.2 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 7.1, \quad (15)$$

$$I_3 = 13.7 - 0.1h + h^2 - 1.1 \cdot 10^{-6}h^3, \sigma = 4.6, \quad (16)$$

где $I_{24 \text{ цикл}}$ — интенсивность линии $\lambda = 6374 \text{\AA}$ усредненная по всем широтам за весь 24-й цикл СА; I_1, I_2, I_3 — усредненная интенсивность красной линии в соответствующей широтной зоне (рис. 5а). Для I_{6374} наблюдается отклонение I_1 от I_3 всего лишь в пределах 6 абс. ед., в отличие от I_{5303} , где разница между этими значениями была 46 абс. ед. [19]. Кривые усредненных значений I_{6374} за весь цикл для разных областей спадают с разной скоростью до высоты $200''$, а на $h > 200''$ кривые I_1, I_2, I_3 сходятся. В отличие от I_{5303} , где кривые I_1, I_2, I_3 продолжают спадать выше высоты $300''$. На больших высотах происходит

повышение интенсивности красной короны по сравнению с зеленой короной. Например, $I_{24\text{цикл}}$ на высоте $h = 300''$ значения $I_{6374} = 7.5$ абс. ед., а I_{5303} на этой же высоте имеют значения 3.5 абс. ед. Если на низких высотах красная корона в интенсивности на много уступает зеленой, то на больших высотах ситуация меняется. Это ещё одно отличие I_{6374} от I_{5303} показывает, что эти линии отвечают за разную природу излучения — замкнутые и открытые МП.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Красная корональная линия $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ (FeX) является второй по интенсивности излучения из всех линий корональной эмиссии в оптическом диапазоне после зеленой линии $\lambda = 5303 \text{ \AA}$ (FeXIV) и также наблюдается на всех позиционных углах солнечного лимба в течение цикла СА. Регистрация корональных наблюдений в 24-м цикле СА была полностью цифровой. Это дало возможность применять методы компьютерной обработки изображений, что позволило более подробно изучать структуру корональных спектральных линий [18]. В результате исследования эмиссионной корональной линии $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ за период 24-го цикла СА показано, что здесь, как и у $\lambda = 5303 \text{ \AA}$, может наблюдаться неоднородная структура линии. Неоднородность вдоль красной линии хоть и не такая ярко выраженная, как у зеленой линии, но она встречается чаще и не только в присутствии АО. Построенные каталоги трех видов ежедневных корональных карт хорошо дополняют друг друга для изучения распределения I_{6374} , они наглядно показывают небольшое смещение максимумов I_{6374} по позиционному углу с высотой (угол наклона “красного луча”). Проведенный анализ протяженности корональной линии на разных фазах СА показал, что распределения максимальной протяженности (h_{max}) в 1-й и во 2-й зонах имеют похожий временной ход и, как правило, превышают высоту линии в полярных зонах. Временное распределение средней протяженности (h_{cp}) красной линии в 3-й зоне опережает на год широтный дрейф нейтральной линии раздела полярности МП Солнца. Таким образом, можно видеть в полярных областях излучение красной линии в противофазе с зеленой линией.

Представлено полученное распределение I_{6374} с высотой для разных фаз цикла СА. Для экваториальных и средних широт (кроме I_{min}) были определены полиномиальные уравнения третьего порядка в качестве аппроксимирующих кривых, в то время как для полярных областей (кроме I_{max}

и I_{\downarrow}) — логарифмические уравнения. Самые высокие значения I_{6374} по всем высотам h имеет кривая на ветви подъема 24-го цикла (I_{\uparrow}) для 1-й зоны. При высоте $h > 100''$ кривые I_{\uparrow} для всех трех рассматриваемых зон имеют наибольшие значения I_{6374} по сравнению с остальными фазами цикла СА. В отличие от зеленой короны, где построенные кривые I_{5303} для фазы максимума превышают кривые для всех других фаз цикла СА. Кривые усредненных значений I_{6374} за весь цикл для разных областей имеют не такие значительные отклонения друг от друга (~ 6 абс. ед.), как аналогично построенные кривые для I_{5303} , где разница между I_1 и I_3 была 46 абс. ед. [19]. Если на низких высотах красная корона в интенсивности намного уступает зеленой, то на больших высотах интенсивность красной короны на несколько абс. ед. выше, по сравнению с зеленой короной.

Корональные линии, наблюдаемые по программе “Служба Солнца”, могут быть использованы для изучения физических процессов в солнечной короне, таких как нагревание и распределение температуры, движение газа и магнитных полей, а также для исследования явлений, связанных с СА, таких как корональные выбросы масс и солнечные вспышки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lyot B.* Étude de la couronne solaire en dehors des éclipses // *Z. Astrophys.* 1932. V. 5. P. 73–95.
2. *Waldmeier M.* Die Sonnenkorona. V. 2. Basel: Birkhauser, 1957. 353 p.
3. *Grottrian W.* Zur Frage der deutung der Linien in Spectrum der Sonnenkorona // *Naturwissenschaften.* 1939. V. 27. Iss. 13. P. 214–214.
4. *Шкловский И.С.* Физика солнечной короны. 2-е изд. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1962. 516 с.
5. *Гневышев М.Н., Гневышева Р.С.* Начало регулярных наблюдений солнечной короны вне затмений // *Бюлл. Комиссии по исследованию Солнца.* 1954. № 10. С. 60–62.
6. *Гневышев М.Н.* Техника и методика корональных наблюдений // *Бюлл. Международного геофизического года.* 1959. С. 36–38.
7. *Тягунов Н.Ф.* Исследования взаимосвязи полуширина — интенсивность для линий излучения короны FeXIV 5303, FeX 6374 и CaXV 5694 в зависимости от высоты // *Солнечно-земная физика.* 2004. № 6. С. 104–105.
8. *Тягунов Н.Ф.* Асимметрия контуров корональной линии FeX $\lambda 6374 \text{ \AA}$ // *Солнечно-земная физика.* 2009. № 14. С. 19–22.

9. Tyagun N.F. Line widths and Doppler velocities according to the Fe X $\lambda 6374$ and Fe XIV $\lambda 5303$ observations performed with the Large Coronagraph at Sayan Observatory // *Geomagnetism and Aeronomy*. 2014. V. 54. Iss. 7. P. 959–964.
10. Делоне А.Б., Макарова Е.А. Исследование контуров красной корональной линии 6374Å по интерферограммам полученным во время солнечного затмения 7 марта 1970 г. // *Астрон. Циркуляр*. 1973. № 772. С. 1–2.
11. Гусева С.А., Ким Гун-Дер, Тлатов А.Г. Результаты наблюдения полного солнечного затмения 29.03.2006 в корональной линии $\lambda 6374\text{\AA}$ на Кисловодской Горной станции // *Тр. конф. “Физическая природа солнечной активности и прогнозирование ее геофизических проявлений”*. СПб.: ГАО РАН, 2007. С. 121–126.
12. Тягун Н.Ф., Степанов В.Е. Широтное распределение полной эмиссии и полуширины корональной линии Fe X 6374\AA // *Солнечные данные*. 1975. № 2. С. 56–64.
13. Singh J., Bappu M.K.V., Saxena A.K. Eclipse observations of coronal emission lines. I. [Fe X] 6374\AA profiles at the eclipse of 16 February 1980 // *J. Astrophys.* 1982. V. 3. P. 249–266.
14. Singh J., Ichimoto K., Imai H., Sakurai T. et al. 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. Гусева С.А. Долговременные циклические изменения структуры солнечной короны: дис. канд. физ. мат. наук. СПб., 2013. 156 с.
16. Singh J., Sakurai T., Ichimoto K. et al. 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.
17. Гусева С.А., Шрамко А.Д. Исследование корональной линии 6374\AA в период минимума солнечной активности // *Тр. конф. “Год астрономии: солнечная и солнечно-земная физика-2009”*. СПб.: ГАО РАН., 2009. С. 147–148.
18. 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.
19. Гусева С.А., Шрамко А.Д. Исследование зеленой корональной линии с высотой по внезатменным наблюдениям за 24-й цикл солнечной активности // *Косм. исслед.* 2023. Т. 61. № 2. С. 124–133.
20. Ким Гун-Дер. Импульсы корональной активности // *Тр. конф. “Солнечная активность как фактор космической погоды”*. СПб.: ГАО РАН., 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 // *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2015. Т. 55. № 3. С. 302–309.

STUDY OF THE RED CORONAL LINE WITH ALTITUDE FROM OUT-OF-ECLIPSE OBSERVATIONS DURING SOLAR CYCLE 24

© 2025 S. A. Guseva*, A. D. Shramko**

*Kislovodsk Mountain Astronomical Station of Central (Pulkovo) Astronomical Observatory,
Russian Academy of Sciences, Kislovodsk, Russia*

**e-mail: svgoal@yandex.ru*

***e-mail: a_shramko@inbox.ru*

The article presents the results of studies of the emission coronal line $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ (FeX) for the period of solar cycle 24. The spectral data were obtained with an out-of-eclipse Lyot coronagraph at the Mountain Astronomical Station of the Pulkovo Observatory, Russian Academy of Sciences (near Kislovodsk). Based on the processing of the results of out-of-eclipse observations, a database of three types of daily coronal maps with a distribution by altitude h from $1 R_{\odot}$ to $1.38 R_{\odot}$ (R_{\odot} is the radius of the Sun) of the red line intensity (I_{6374}) was created. Throughout the solar cycle, spectral observations demonstrating a Doppler shift along the red line $\lambda = 6374 \text{ \AA}$ were found. The extension of the red line from the limb position angle of the Sun was calculated. It was shown that the maximum value of the average extension of the coronal line over the entire limb falls on the ascent branch of solar cycle 24. For different phases of the considered solar cycle (for the ascending branch, the period of maximum, the descending branch and the minimum of solar activity) and for different regions of solar activity, the dependences of the change in I_{6374} values with altitude were plotted and explained. A regression analysis of the obtained relationships is carried out. The regression equations are presented. The changes in I_{6374} with altitude for the polar regions (for all phases of the cycle except for the maximum and the descending branch) and for the middle latitudes (for the minimum of activity) most likely have a logarithmic dependence, and the approximating trend curves for the remaining latitudinal zones are determined by a third-order power function.