

УДК 523.9

М. І. Пішкало, О. Р. Баранський

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
04053 Київ-53, вул. Обсерваторна 3

**Сонячна корона під час повного сонячного затемнення
1 серпня 2008 р.**

Досліджено форму і структуру сонячної корони під час повного сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. Корона 1 серпня 2008 р. є короною білямінімального типу, в якій виділяються добре розвинуті північна та південна полярні променеві системи над полярними корональними дірами і кілька променів-стрімерів різної яскравості на середніх і низьких геліоширотах. Індекс фотометричної стиснутості сонячної корони становить 0.21.

СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА ВО ВРЕМЯ ПОЛНОГО СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 1 АВГУСТА 2008 г., Пишкало Н. И., Баранский А. Р. — Исследованы форма и структура солнечной короны во время полного солнечного затмения 1 августа 2008 г. Корона 1 августа 2008 г. является короной околominiмального типа, в которой выделяются хорошо развитые северная и южная полярные лучевые системы над полярными корональными дырами и несколько лучей-стримеров различной яркости на средних и низких гелиоширотах. Индекс фотометрического сжатия солнечной короны составляет 0.21.

SOLAR CORONA DURING THE TOTAL SOLAR ECLIPSE ON AUGUST 1, 2008, by Pishkalo M. I., Baransky A. R. — Shape and structure of the solar corona during the total solar eclipse on August 1, 2008 were studied. Corona on August 1, 2008 was classified as corona of the near-minimal type with well developed northern and southern polar ray systems over polar coronal holes and several streamers of different brightness, located in middle and low heliographic latitudes. The flattening index was found to be 0.21.

ВСТУП

Хоча в наш час сонячна корона регулярно спостерігається за допомогою коронографів на борту космічних обсерваторій SOHO і STEREO, наземні спостереження корони під час повних сонячних затемнень зберігають свою важливість та унікальну інформативність для геліофізики. Саме наземні спостереження корони під час повних сонячних затемнень є найбільш інформативними при вивченні тонкої структури внутрішньої і середньої корони Сонця, а отже структури магнітного поля в короні. Крім того, історія наземних спостережень корони значно триваліша за космічну, що дозволяє детальніше досліджувати, наприклад, деякі аспекти зв'язку форми і структури корони із сонячною активністю.

Нижче подаються попередні результати дослідження форми і структури сонячної корони під час повного сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. за наземними фотографічними спостереженнями. Проведено також порівняння отриманих результатів із даними для інших затемнень.

СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ

Смуга повного сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. проходила від арктичного узбережжя Канади, через Гренландію, Північний Льодовитий океан, острови Шпіцберген і Нова Земля, п-ів Ямал, Західний Сибір, Алтай, Казахстан (частково), Монголію і Китай. Найбільша фаза затемнення, що становила 1.039 при висоті Сонця над горизонтом біля 33.5° і тривалості повної фази 2 хв 27 с, спостерігалася поблизу російського міста Надим на півночі Західно-Сибірської рівнини. «Столицею» затемнення був Новосибірськ, де перебувала більшість експедицій, що спостерігали затемнення.

Серія фотографій корони 1 серпня 2008 р., що лягла в основу даної роботи, була отримана О. Баранським поблизу центру місячної тіні, на відстані 1 км на північний схід від с. Бочкарьово Черепановського району Новосибірської області (широта $54^\circ 15' 28''$; довгота $83^\circ 28' 33''$, висота над рівнем моря 292 м). Всього було отримано 17 знімків корони з експозиціями від $1/250$ до $1/3$ с з чутливістю ISO-800 за допомогою цифрової камери «Canon EOS 350D» і телеоб'єктива МТО-500 ($D = 5$ см, $F = 0.5$ м, $A = 1/10$). Розмір матриці становить 3456×2304 пікселів, кутовий розмір кадру в системі «камера — телеоб'єктив» — $2.5^\circ \times 1.6^\circ$.

При побудові структурного рисунка і для уточнення структури корони були також використані знімки коронографів LASCO C2 і C3 орбітальної сонячної обсерваторії SOHO (<http://sohowww.nascom.nasa.gov>), знімки На-лімбового коронографа обсерваторії Пік дю Міді (архів <http://bass2000.obspm.fr>) та зображення корони під час даного

затемнення, зокрема чудові зображення Друкмюллера із колегами (<http://www.sam.fme.vutbr.cz/~druck/Eclipse/Ecl2008m>).

ФОРМА І СТРУКТУРА СОНЯЧНОЇ КОРОНИ

Сонячне затемнення 1 серпня 2008 р. відбулося поблизу мінімуму 24-го циклу сонячної активності. Зазвичай для обчислення значення фази сонячної активності на момент затемнення $T_{\text{зат}}$ за формулою $\Phi = (T_{\text{зат}} - T_{\text{min}}) / (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$ потрібно знати моменти сусідніх мінімуму T_{min} і максимуму T_{max} активності. У нашому випадку точне знання моментів T_{min} і T_{max} неможливе, оскільки вони визначаються за згладженими місячними значеннями чисел Вольфа. Місячне незгладжене число Вольфа для липня і серпня 2008 р. є дуже низьким і за попередніми даними Бельгійської Королівської обсерваторії (<http://sidc.oma.be/DATA/monthssn.dat>) становить приблизно 0.5. Про точне значення згладженого місячного числа Вольфа на момент затемнення можна буде говорити лише через кілька місяців після затемнення. Поточний аналіз місячних чисел Вольфа і сонячної активності (<http://bbso.njit.edu/Research/ActivityReport>) показує, що мінімум 24-го циклу сонячної активності, найбільш імовірно, стався у кінці першої третини — всередині 2008 р., тобто, наприклад, приблизно на півроку пізніше від моменту, знайденого у роботі [2]. Отже, затемнення 1 серпня 2008 р. відбулося на фазі росту сонячної активності. Користуючись прогнозом циклу 24 і формулою (3) з роботи [2], а також враховуючи невизначеність моментів T_{min} і T_{max} , для затемнення 1 серпня 2008 р. у даній роботі надалі ми приймаємо значення $\Phi = 0.1$.

Сонячна корона під час повного сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. є короною білямінімального типу [4, с. 77]. Для кількісної характеристики форми сонячної корони під час затемнення і порівняння з даними для інших затемнень найчастіше використовують індекс фотометричної стиснутості корони β , введений Людендорфом у 1928 р. [9] (формулу для β можна також знайти у роботах [3, 8]). Відзначимо, що класичний параметр Людендорфа отримується екстраполяцією початкової лінійної залежності β від радіуса екваторіальної ізофоти r_e на відстань $r_e = 2R_{\odot}$ (сонячних радіусів).

На рис. 1, а показано залежність $\beta(r_e)$ для кожної з півкуль (ромбики — для північної півкулі, хрестики — для південної). Суцільна і штрихова криві лінії зображають середній хід залежності $\beta(r_e)$ для всіх отриманих нами 44 ізофот (інтерполяція поліномом степеня 3), відповідні прямі лінії — лінійне наближення для перших 26 ізофот (r_e для яких відповідає інтервалу $(1.15...1.65)R_{\odot}$). Пунктирні лінії показують, як знаходиться значення β при $r_e = 2R_{\odot}$.

Знайдене нами значення індекса фотометричної стиснутості для корони 2008 р. становить 0.21. Окремо для північної і південної півкуль значення цього індекса становить відповідно 0.22 і 0.19.

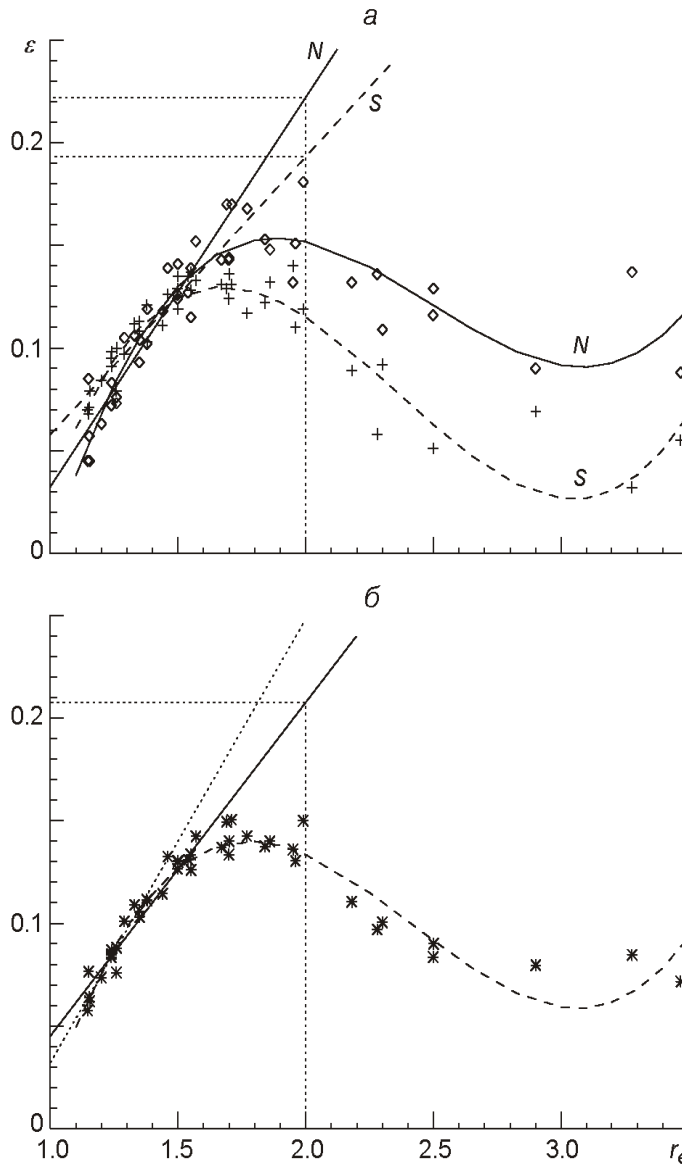


Рис. 1. Залежність індекса фотометричної стиснутості корони від радіуса екваторіальної ізофоти r_e : а — для північної і південної півкуль, б — сумарна залежність для обох півкуль

Рис. 1, б ілюструє сумарну залежність індекса фотометричної стиснутості корони від радіуса екваторіальної ізофоти r_e . Похила суцільна пряма показує лінійну екстраполяцію перших 26 точок, а пунктир — перших 13 точок ($r_e = (1.15...1.35)R_\odot$). Бачимо, що отримане значення при $r_e = 2R_\odot$ залежить від вибраної кількості початкових точок (0.21 і 0.25 відповідно для 26 і 13 точок), тобто є дещо суб'єктивним. Надалі в роботі при порівнянні з даними для інших затемнень за остаточне приймається значення $\epsilon = 0.21$, отримане лінійною екстраполяцією перших 26 точок.

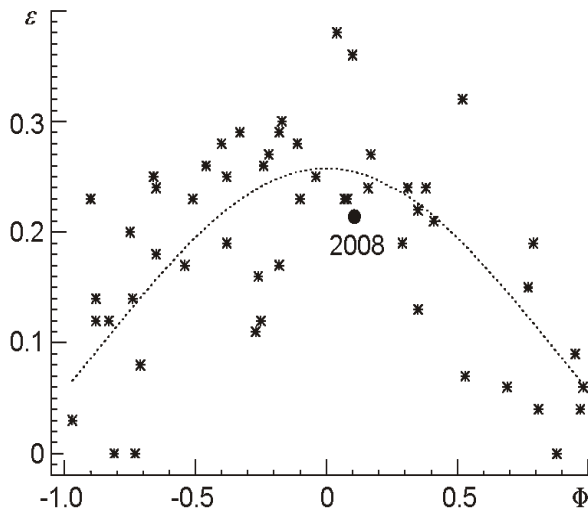


Рис. 2. Залежність індекса фотометричної стиснутості корони від фази сонячної активності Φ для 54 затемнень 1893—2008 рр.

Залежність індекса фотометричної стиснутості корони від фази сонячної активності за даними для 53 повних сонячних затемнень 1893—2006 рр. показана на рис. 2. Отримане нами значення для затемнення 1 серпня 2008 р. нанесено чорним кружечком. Штрихова лінія показує середній хід залежності (Φ), що описується рівнянням $\epsilon = 0.099 + 0.159\cos(1.834\Phi)$. З рис. 2 випливає, що стиснутість сонячної корони 1 серпня 2008 р. дещо менша за середній хід (Φ) для попередніх затемнень Сонця. Ця відмінність може бути пояснена як певним суб'єктивізмом у виборі початкової кількості точок для лінійної інтерполяції залежності (r_e), так і можливою неточністю прийнятого нами значення фази сонячної активності Φ .

У структурі сонячної корони 1 серпня 2008 р. виділяються добре розвинуті північна та південна полярні променеві системи над полярними корональними дірами і кілька променів різної яскравості на середніх і низьких геліоширотах. На E-лімбі можна виділити три промені, на W-лімбі — два. Структуру сонячної корони 1 серпня 2008 р. показано на рис. 3. Промені позначені літерами А—Е.

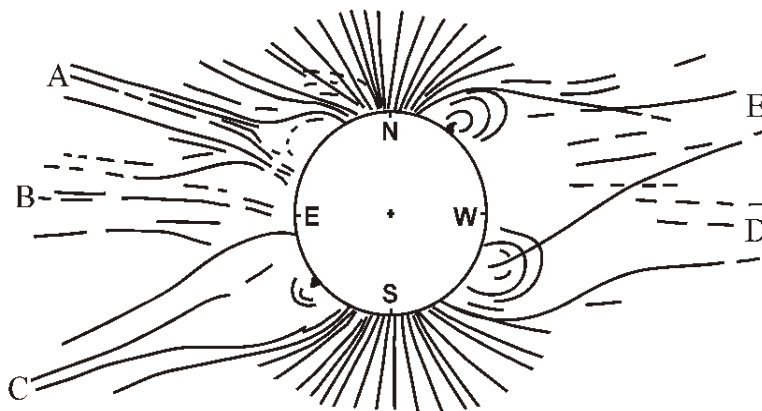


Рис. 3. Структурний рисунок сонячної корони 1 серпня 2008 р.

Північна полярна променева система має протяжність вздовж лімба приблизно 40° (від позиційного кута 345 до 25° , позиційний кут вимірюється від північного геліографічного полюса у напрямку, протилежному руху годинникової стрілки). Протяжність південної полярної променевої системи складає біля 70° (142 — 212°). Обидві полярні променеві системи складаються із 10 — 12 широких променів (полярних променів або щіточок), які у свою чергу містять до 50 — 60 тонших променів (3 — 8 на кожен щіточку) з поперечником до $0.01R_\odot$. Полярні промені на полюсах є радіальними, інші нахилені у бік екватора. Відхилення полярних променів-щіточок від радіального напрямку у бік екватора зростає зі збільшенням відстані основи променя від полюса, досягаючи значень 40 — 45° для найбільш віддалених від полюса променів.

Дотичні до північних полярних променів перетинаються в деякій області на відстані приблизно $0.76R_\odot$ від центра сонячного диска, дотичні до південних полярних променів — на відстані приблизно $0.64R_\odot$ від центра сонячного диска. Таким чином, відстань між так званими ефективними магнітними фокусами полярного магнітного поля Сонця під час затемнення 1 серпня 2008 р. становить 0.7 сонячного діаметра, що добре узгоджується із даними для інших затемнень в епоху мінімуму сонячної активності [1, 3, 4].

Полярні променеві системи свідчать про наявність відкритих магнітних структур — полярних дір, які також простежуються за значним зниженням яскравості в полярних областях Сонця, наприклад, на знімках приладу EIT у день затемнення в лінії 19.5 нм на борту супутника SOHO (<http://sohowww.nascom.nasa.gov>).

Промінь А має протяжність вздовж лімба біля 45° (22 — 67°) і нахилений у бік екватора на кут 25° . Ймовірно, його шоломоподібна основа знаходиться частково на видимій півсфері Сонця, а його купол частково накладається на північну полярну променеву систему у вигляді кількох скривлених променів, показаних штрихами на рис. 3. Промінь В (67 — 100°) є слабким радіальним потоком. Яскравий шоломоподібний промінь С (100 — 155°) нахилений відносно локальної нормалі на лімбі на 16° в бік екватора. Шоломоподібні промені D і E накладаються на відстанях до $2.5R_\odot$, разом займаючи вздовж W-лімба біля 133° (212 — 345°), і нахилені в бік екватора відповідно на 2 — 3° і 8 — 10° .

Найяскравішим на E-лімбі є промінь С, на W-лімбі — промінь E. Їхні широти на відстані $(2.5\text{...}3.5)R_\odot$ від центра Сонця ($28S$ і $12N$ відповідно) досить добре узгоджуються із розрахованими у короні для відповідного керінгтонівського оберту у класичному потенціальному наближенні за даними Сонячної обсерваторії Вілкокса (<http://wso.stanford.edu>) положеннями магнітної нейтральної лінії ($30S$ і $4N$ відповідно). Аналіз знімків коронографа Lasco C2 орбітальної сонячної обсерваторії SOHO за кінець липня — початок серпня 2008 р. свідчить про те, що промені D і E на W-лімбі і промінь С на E-лімбі

можуть бути проявами єдиного об'єкта — геліосферного струмового шару в короні.

В основі усіх променів за даними лімбового H -коронोगрафа обсерваторії Пік дю Міді незадовго до або після затемнення спостерігалися невеликі протуберанці; їх можна бачити також у внутрішній короні на деяких знімках під час затемнення. Дугові системи над протуберанцями в основі променів C, D, E добре помітні на зображеннях корони, отриманих Друкмюллером з колегами (<http://www.sam.fme.vutbr.cz/~druck/Eclipse/Ecl2008m>) за допомогою нового методу обробки фотографій сонячної корони, описаного у роботі [7].

Якщо порівняти корону 1 серпня 2008 р. із іншими коронами із каталогів [4, 8] та робіт [5, 6], то слід відзначити, що вона є подібною до білямінімальних корон, що спостерігалися 01.01.1889, 20.09.1922, 10.09.1923, 09.06.1945, 20.06.1955, 23.10.1976 та 03.11.1994 рр.

Для сонячної корони 1 серпня 2008 р., як і для корони 29 березня 2006 р. та більшості інших корон, характерна певна E/W- і N/S-асиметрія. Корона на E-лімбі є дещо активнішою, ніж на W-лімбі. Протяжність уздовж лімба північної полярної променевої системи майже удвічі менша, ніж протяжність південної полярної променевої системи.

ВИСНОВКИ

Повне сонячне затемнення 1 серпня 2008 р. відбулося на фазі росту 24-го циклу сонячної активності, невдовзі після мінімуму. Фаза сонячної активності становила приблизно 0.1. Сонячна корона 1 серпня 2008 р. є короною білямінімального типу. Вона характеризується наявністю п'яти низько- та середньоширотних променів різної яскравості та розвиненими північною і південною полярними променевими системами над полярними корональними дірами. Відстань між ефективними магнітними фокусами полярного магнітного поля Сонця під час затемнення 1 серпня 2008 р. становила приблизно 0.7 сонячного діаметра. Геліоширота найяскравіших променів на E- і W-лімбах узгоджується із розрахованими в потенціальному наближенні положеннями магнітної нейтральної лінії на так званій «поверхні джерела» за даними Сонячної обсерваторії Вілкокса. Сумарний індекс фотометричної стиснутості сонячної корони за Людендорфом на відстані $2R_{\odot}$ становить 0.21, окремо для північної і південної півкуль — відповідно 0.22 і 0.19.

Автори щиро вдячні співробітникам консорціуму SOHO, Сонячної обсерваторії Вілкокса, Медонської обсерваторії, Бельгійської Королівської обсерваторії, обсерваторій Біг Бер і Пік дю Міді, а також Мілославу Друкмюллеру (Технологічний університет м. Брно, Чеська Республіка) за можливість роботи з їхніми даними через інтернет.

Робота виконана за часткової підтримки Державного фонду фундаментальних досліджень України (проект № Ф25.2/094).

1. Клепиков Д. В., Филиппов Б. П., Аджабширизаде А., Платов Ю. В. Эволюция положений магнитных фокусов полярного поля Солнца с фазой цикла солнечной активности // *Астрон. журн.*—2006.—**83**, № 10.—С. 932—939.
2. Пішкало М. І. Попередній прогноз 24-го і 25-го циклів сонячної активності на основі кореляції між характеристиками циклів // *Кинематика и физика небес. тел.*—2008.—**24**, № 5.—С. 370—378.
3. Пішкало М. І., Садовенко Є. В. Структура і форма сонячної корони під час повного сонячного затемнення 29 березня 2006 р. // *Кинематика и физика небес. тел.*—2008.—**24**, № 1.—С. 61—69.
4. *Солнечная корона и корпускулярное излучение в межпланетном пространстве.* Под ред. С. К. Всехсвятского. — Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1965.—216 с.
5. Badalyan O. G., Šykora J. Solar corona during the 1994 and 1999 eclipses // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.*—2008.—**38**, N 3.—P. 519—537.
6. Belik M., Markova E., Rušin V. White-light coronal structures during the 1988–1998 eclipses // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.*—1999.—**28**, N3.—P. 230—236.
7. Druckmüller M., Rušin V., Minarovjech M. A new numerical method of total solar eclipse photography processing // *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso.*—2006.—**36**, N 3.—P. 131—148.
8. Loucif M. L., Koutchmy S. Solar cycle variations of coronal structures // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1989.—**77**.—P. 45—66.
9. Ludendorff H. Über die Abhängigkeit der Form der Sonnenkorona von der Sonnenfleckenhäufigkeit // *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Klasse.*—1928.—**16**.—P. 185—192.

Надійшла до редакції 15.12.08