

УДК 523.982

Н. Лоцицька, канд. фіз.-мат. наук,
Астрономічна обсерваторія
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

МАГНІТНІ ПОЛЯ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ У 24-МУ ЦИКЛІ СОНЯЧНОЇ АКТИВНОСТІ

Порівнюються дані візуальних вимірювань магнітного поля в тіні сонячних плям, отримані в чотирьох обсерваторіях протягом 24-го циклу сонячної активності. Проаналізовано модулі напруженості магнітного поля із усередненням по кожній обсерваторії. Базовими в дослідженні взято вимірювання в Астрономічній обсерваторії Київського університету (КАО), де 170 плям були виміряні в середньому 4 рази кожна з інтервалом 1–2 доби за проходження групи диском Сонця. Для порівняння з даними КАО використано вимірювання обсерваторій Уральської, Кримської та Маунт Вілсон, які виконані в межах 24 год від часу спостережень у КАО. Середні за цикл значення магнітного поля плям, отримані за даними трьох обсерваторій, УрАО, КраО і КАО, становили 26.0 ± 0.3 , 25.0 ± 0.2 та 25.2 ± 0.2 сТл, відповідно. Вони відрізняються між собою не більше ніж на 3 стандартні похибки, тоді як обсерваторія Маунт Вілсон дає достовірно нижче середнє магнітне поле – 23.8 ± 0.1 сТл. Цей результат підтверджує висновки роботи R. Rezaei et al., 2015, де порівнюються візуальні вимірювання в Маунт Вілсон з даними Tenerife Infrared Polarimeter (TIP) та Facility Infrared Spectropolarimeter (FIRS) у 23–24-му циклах сонячної активності: середнє значення магнітного поля за спостереженнями TIP і FIRS у 24-му циклі дорівнює 26.0 сТл, що незначно вище отриманого нами з візуальних спостережень трьох обсерваторій, тоді як MtW показує на кілька сантитесла менше. Середньоквадратична похибка середнього за цикл магнітного поля за даними TIP та FIRS становить 0.2 сТл, тому різниця з MtW достовірна. Заниження вимірної напруженості магнітного поля плям у Маунт Вілсон потребує перегляду калібровки вимірювань.

Для обчислення щорічного індексу V_{sp} магнітних полів сонячних плям розміром 22–44 Мм традиційно використано дані візуальних вимірювань усіх чотирьох обсерваторій. Отримано, що варіації магнітного поля сонячних плям мають характерний для попередніх циклів пік на другий – третій рік після максимуму кількості плям. Середній за 24-й цикл індекс V_{sp} дорівнює 24.9 ± 0.3 сТл, що свідчить про те, що цей цикл є помірно сильним. Зменшення магнітного поля сонячних плям у 2018 р. до 23 сТл дає підставу очікувати у 2019 р. найбільший за півстоліття приземний рівень галактичних космічних променів.

Ключові слова: сонячна активність, магнітні поля, сонячні плями, галактичні космічні промені.

1. Методи вимірювання магнітних полів сонячних плям. У 1897 р. Пітер Зеєман виявив розщеплення і поляризацію спектральних ліній у магнітному полі. За цим ефектом у 1908 р. Джордж Елері Хейл виявив магнітні поля сонячних плям і розпочав їх неперервний моніторинг. 100-літній архів візуальних вимірювань магнітних полів сонячних плям в обсерваторії Маунт Вілсон є у відкритому доступі за адресою <ftp://howard.astro.ucla.edu/pub/obs/drawings>. У другій половині ХХ ст. спостереження магнітних полів плям проводили вже десять обсерваторій, і лише кілька з них продовжують неперервний ряд візуальних визначень напруженості магнітних полів у новому столітті. Це, окрім обсерваторії Маунт Вілсон, ще три обсерваторії: Кримська астрофізична, Уральська і Київська астрономічні обсерваторії. Інтенсивно розвиваються складніші нові методи реєстрації магнітного поля в сонячних утвореннях, зокрема в плямах, такі як магнітографічний і поляриметричний. Магнітографи є в наземних обсерваторіях, а також на супутниках SOHO, SDO. Основна проблема магнітографічних вимірювань – насичення сигналу при вимірюванні сильних магнітних полів, напруженість яких перевищує 3000 Гс [8], через що в ядрах великих сонячних плям неможливо отримати дійсну величину поля й недооцінювання її становить десятки відсотків. Поляриметри дають змогу інверсним методом розрахувати дійсну величину магнітного поля за записами сигналу зеєманівського розщеплення V-параметрів Стокса, такий прилад установлено на HINODE, працюючи Tenerife Infrared Polarimeter (TIP) та Facility Infrared Spectropolarimeter (FIRS) [8].

2. Метою роботи є продовження досліджень вікових варіацій магнітних полів сонячних плям, розпочатих автором у 2000 р. У цій роботі ми проводимо попарне порівняння результатів візуальних вимірювань магнітних полів сонячних плям, зроблених на Горизонтальному сонячному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського університету (КАО), з такими ж вимірюваннями в межах однієї доби в обсерваторіях Маунт Вілсон, Кримській астрофізичній та Коуровській обсерваторії Уральського університету. Загалом протягом 24-го циклу сонячної активності в КАО проведено 660 вимірювань магнітних полів сонячних плям, до розгляду бралися лише вимірювання в одному ядрі, де поле було найбільшим. Оскільки не завжди погодні умови дозволяли провести спостереження в інших обсерваторіях, то ряди пар одночасних вимірювань із вищеназваними трьома обсерваторіями відповідно містять 95, 80 і 50 % від кількості зроблених у КАО. **Задачами роботи** є порівняння середніх величин магнітного поля з масиву візуальних вимірювань у чотирьох обсерваторіях протягом 24-го циклу сонячної активності із середніми величинами магнітних полів крупних сонячних плям, отриманими за спектрополяриметричними спостереженнями в роботі [8], і розрахунок індексу V_{sp} середньорічних модулів напруженості магнітних полів сонячних плям розміром 30–60 дугових секунд (22–44 Мм) у 2009–2018 рр.

3. Деякі технічні характеристики телескопів, де проводяться візуальні спостереження. Головне дзеркало 150-футового баштового сонячного телескопа в обсерваторії Маунт Вілсон (MtW) має діаметр 61 см і фокусну відстань 18.3 м. Застосування додаткового дзеркала дає еквівалентну фокусну відстань 45.7 м, при тому діаметр зображення Сонця становить 42 см. Магнітні поля плям вимірювались за зеєман-розщепленням лінії Fe I 6173.3 Å, а з 1961 р. – лінії Fe I 5250.2 Å. Детальний опис сонячного телескопа MtW, а також дані спостережень на ньому є за адресою <http://obs.astro.ucla.edu/intro.html>.

В обсерваторії Уральського університету (UrAO) проводяться візуальні вимірювання магнітних полів сонячних плям на горизонтальному сонячному телескопі АЦУ-5 з 1966 р., використовується лінія Fe I 5250.2 Å. Діаметр головного дзеркала становить 440 мм, воно має фокусну віддаль 17.5 м, еквівалентний фокус Касегрена 60.5 м. Телескоп дає зображення Сонця діаметром 16 см у прямому фокусі на щілині спектрографа або 56 см – на екрані у фокусі Касегрена (<https://astro.ins.ufru.ru/solar>). Архів усіх даних UrAO є на сайті ГАО РАН http://www.gaoran.ru/english/database/sd/daily_sun_charts.htm

Візуальні вимірювання напруженостей магнітних полів сонячних плям у Кримській астрофізичній обсерваторії (CrAO) на телескопі БСТ-2 проводяться з 1955 р., спочатку в лінії FeI 6173.3 Å, а з 1957 р. – у лінії FeI 6302.5 Å. Вимірюється максимальна віддаль між сігма-компонентами цієї лінії, розщепленої в магнітному полі сонячної плями. Головне дзеркало телескопа має діаметр 450 мм і фокусну відстань 12 м, еквівалентну фокусну відстань 35 м. Електронний архів спостережень CrAO з 1983 р. розміщений на ресурсі <http://solar.crao.crimea.ru/rus/tst2.htm>. Він містить замальовки всього диска Сонця розміром 12 см і окремо – кожної групи плям у масштабі, що відповідає зображенню Сонця з діаметром 43 см. На замальовках груп плям зазначені вимірні величини магнітного поля кожної плями.

Горизонтальний сонячний телескоп (ГСТ) Астрономічної обсерваторії Київського університету (КАО) побудовано у 1954 р., головне дзеркало діаметром 30 см із фокусною відстанню 12.5 м. Діаметр зображення Сонця на щілині становить 12 см [1]. Вимірювання розщеплення сігма-компонент проводяться з 1979 р. з поляризаційною мозаїкою В. Н. Скоморовського (зводяться центри ваги сігма-компонент у сусідніх смужках мозаїки), з 1999 р. – переважно з призмою-розщеплювачем із ісландського шпату (зводяться сігма- з пі-компонентою зеєманівського розщеплення). Використовується лінія Fe I 5250.2 Å. Додаткові елементи – чвертьхвильова пластинка з кварцу та плоскопаралельна поворотна скляна пластинка. Кут повороту цієї пластинки для отримання величини магнітного поля окремо прокалібровано для вимірювань із мозаїкою та призмою.

4. Калібрування пристроїв для візуальних вимірювань магнітних полів сонячних плям. Питання калібрування вимірювань зеєманівського розщеплення – одне з найважливіших при опрацюванні даних магнітометричних спостережень. Напруженість магнітного поля однієї й тієї ж плями, виміряна на різних телескопах, може відрізнитися через: різні погодні умови, передусім різну величину дрижання зображення в різний час дня; неоднаковий внесок ефектів температурного розфокусування, інструментальної поляризації; неточну калібровку кутів повороту або нахилу плоскопаралельної пластинки лайншифтера; швидкі зміни напруженості магнітного поля плями сонячного походження та відмінності методики спостережень (використання різних спектральних ліній, застосування поляризаційної мозаїки або призми-розщеплювача і, відповідно, вимірювання розщеплення при зведенні σ - σ - або σ - π -компонент.

Калібрувальні залежності для лайншифтерів CrAO та MtW є в роботах [6, 7], проте за будь-яких змін оптичної схеми спектрографа чи лайншифтера необхідне повторне калібрування. Нами у 2007 р. проведено порівняння пар даних візуальних вимірювань магнітних полів сонячних плям, виконаних у 23-му циклі сонячної активності в одні й ті самі дні в обсерваторіях CrAO, UrAO, KAO та MtW [4]. У межах похибок дані трьох перших обсерваторій збігалися, тоді як середні значення магнітного поля, виміряні в обсерваторії Маунт Вілсон, занижені на 3 сТл (10 стандартних похибок) порівняно з даними CrAO, UrAO та KAO. Знайомство з нотатками на замальовках у MtW, доступних на ресурсі <http://obs.astro.ucla.edu/intro.html>, дозволило знайти причину такого розходження. У листопаді 1994 р. на баштовому сонячному телескопі обсерваторії Маунт Вілсон була встановлена нова дифракційна ґратка з більшою дисперсією, що потребувало введення коригуючих множників до показань мікрометра при перерахунку градусів нахилу пластинки в напруженість магнітного поля. Імовірно, при визначенні поправочних коефіцієнтів допущена помилка, яку можна виправити, якщо виконати нове емпіричне калібрування.

Оскільки ця робота базується на вимірюваннях у КАО, то насамперед вивірена калібрувальна залежність величини магнітного поля від кута нахилу плоско-паралельної пластини лайншифтера. Використані вимірювання зеєманівського розщеплення лінії заліза 5250.2 Å з призмою Воластона на ГСТ КАО. На рис. 1 і в табл. 1 наведено порівняння теоретичної залежності "кут нахилу – напруженість магнітного поля" та отриманої зі спостережень.

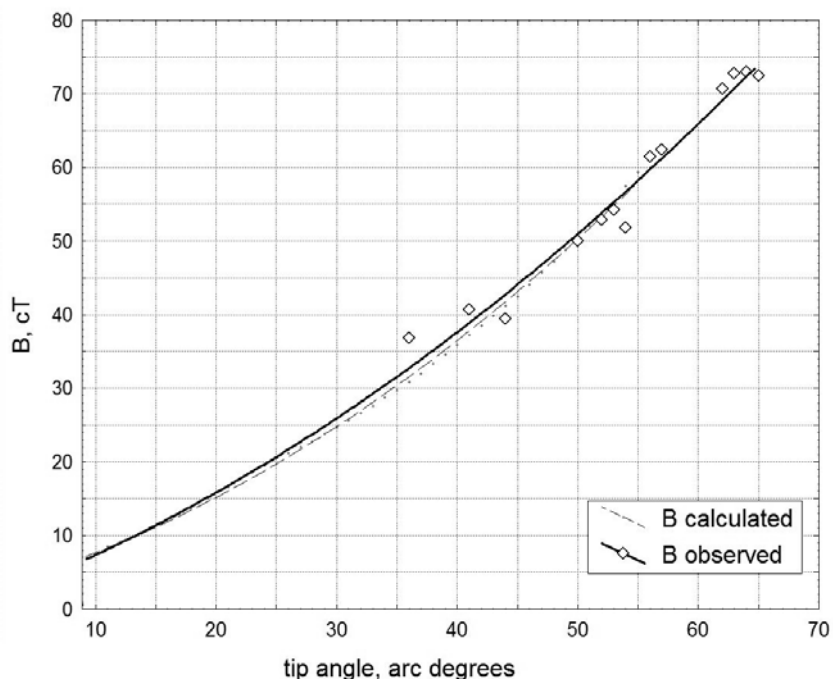


Рис. 1. Калібрувальна залежність величини магнітного поля від кута нахилу плоско-паралельної пластини лайншифтера при вимірюваннях зеєманівського розщеплення лінії заліза 5250.2 Å з призмою Воластона на Горизонтальному сонячному телескопі Київської астрономічної обсерваторії

Таблиця 1

Співвідношення між кутом нахилу пластинки лайншифтера (1) та модулем напруженості магнітного поля (2, 3) при вимірюваннях із призмою Воластона на горизонтальному сонячному телескопі КАО

Кут нахилу пластинки лайншифтера, градуси дуги	Теоретична калібровка В, сТ	Експериментальна калібровка В, сТ	Кут нахилу пластинки лайншифтера, градуси дуги	Теоретична калібровка В, сТ	Експериментальна калібровка В, сТ
11	8,5	8,4	30	24,6	26,0
12	9,1	9,0	31	25,6	27,1
13	9,8	9,7	32	26,6	28,2
14	10,6	10,5	33	27,6	29,3
15	11,4	11,4	34	28,7	30,4
16	12,2	12,3	35	29,7	31,5
17	13,2	13,1	36	30,8	32,7
18	14,0	14,0	37	32,0	33,9
19	15,0	14,9	38	33,3	35,2
20	15,8	15,8	39	34,6	36,5
21	16,6	16,7	40	35,9	37,7
22	17,6	17,7	41	37,2	38,9
23	18,6	18,7	42	38,5	40,1
24	19,5	19,7	43	39,8	41,4
25	20,4	20,7	44	41,2	42,7
26	21,2	21,7	45	42,5	44,0
27	22,0	22,7	46	44,0	45,4
28	22,8	23,8	47	45,7	46,8
29	23,8	24,9	48	47,2	48,2

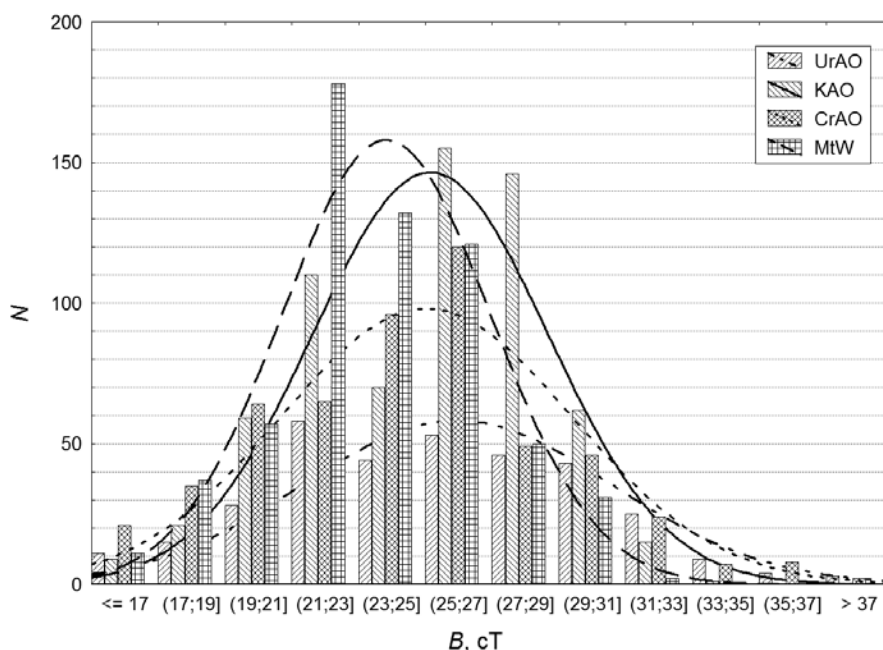


Рис. 2. Гістограми розподілу магнітного поля сонячних плям, вимірюного візуально в чотирьох обсерваторіях у 24-му циклі сонячної активності

При розрахунках теоретичної залежності для кожного кута повороту пластинки при відомому показнику заломлення скла і товщині пластинки розраховувався зсув зображення спектра в міліметрах. Величина зсуву в ангстремах обчислювалася за відомою дисперсією в 39-му порядку спектра $0.65 \text{ \AA}/\text{мм}$. Напруженість магнітного поля для вимірювань у лінії $\text{Fe I } 5250.2 \text{ \AA}$ знаходили за формулою $B = 2.59 \times 10^4 \Delta\lambda_n$, де за розщепленням $\Delta\lambda_n$ в \AA отримуємо напруженість магнітного поля в гаусах (стовпчик 2).

Для експериментальної калібровки (стовпчик 3) вимірювалися кути нахилу пластинки лайншифтера при зведенні близько розташованих 13 пар немагнітних ліній зеленої області спектра, відстань між якими не перевищувала 0.3 \AA , які мають довжини хвиль в околі магніточутливої лінії $\text{Fe I } 5250.2 \text{ \AA}$ ($\pm 25 \text{ \AA}$). Далі зіставлялися кути нахилу лайншифтера з обчисленими за різницею довжин хвиль значеннями напруженості магнітного поля у припущенні, що цей зсув був обумовлений зееманівським розщепленням лінії з фактором Ланде, що дорівнює 3, як у лінії $\text{Fe I } 5250.2 \text{ \AA}$.

5. Отримані результати вимірювань у чотирьох обсерваторіях. Розрахунки середніх значень показали таке: середні напруженості магнітного поля в MtW 23.8 ± 0.1 сТл, в CrAO 25.0 ± 0.2 сТл, UrAO 26.0 ± 0.3 сТл, KAO 25.1 ± 0.2 сТл. Із цих результатів і рис. 2 видно, що, як і в роботах [4, 8], середні значення трьох обсерваторій прак-

точно збігаються, але дані обсерваторії Маунт Вілсон достовірно нижчі за рахунок зменшення відносної кількості вимірювань магнітного поля напруженістю 23 сТл і більше і повної відсутності значень понад 32 сТл.

Регресійні залежності, показані на рис. 3, також ілюструють звуження ширини розподілу даних MtW за рахунок обмеження кількості випадків сильних магнітних полів. Тоді як нормально розподілені дані CrAO і UrAO досягають 39–40 сТл, межа відкоректованих значень виміряного магнітного поля в MtW – 32 сТл. Результати вимірювання в КАО значно ближчі до CrAO і UrAO, однак магнітні поля, вищі за 33.5 сТл, у КАО не спостерігалися. Астроклімат у Кримській обсерваторії дозволяє проводити спостереження в 1.5 раза частіше, ніж в Уральській обсерваторії, калібрувальні криві багатократно досліджені, тому дані CrAO можна вважати еталонними для порівняння з іншими обсерваторіями з метою уніфікації методики вимірювань [7].

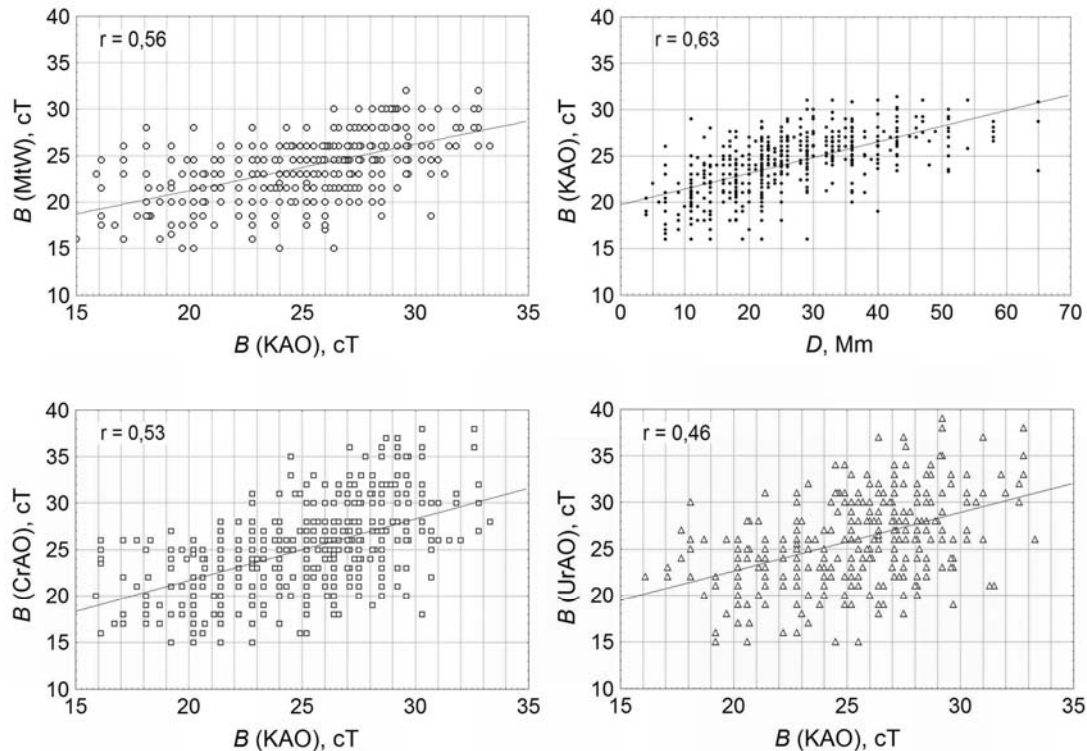


Рис. 3. Регресійні залежності між візуально оціненими напруженостями магнітного поля в ядрах одних і тих самих сонячних плям, вимірними протягом доби в Київській астрономічній обсерваторії (КАО) і обсерваторіях Маунт Вілсон (MtW), Кримській астрофізичній (CrAO) та Уральській астрономічній (UrAO). Усі спостереження проведені в 24-му циклі сонячної активності. Також показана регресійна залежність між середнім діаметром плям і напруженістю магнітного поля, вимірній у КАО

Порівняння коефіцієнтів кореляції пар даних спостережень із різних обсерваторій, проілюстроване на рис. 3, показало, що вони пов'язані з вірогідністю, більшою за 99 %, і немає достовірних відмінностей між попарними коефіцієнтами кореляції даних чотирьох обсерваторій. Це свідчить про цінність даних візуальних вимірювань магнітних полів сонячних плям, отриманих і на великих, і на середніх телескопах.

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції між парами одночасних візуальних вимірювань напруженості магнітних полів сонячних плям у чотирьох обсерваторіях у 1999–2004 [4] і 2010–2017 рр.

	КАО		CrAO		UrAO	
	23 цикл	24 цикл	23 цикл	24 цикл	23 цикл	24 цикл
CrAO	0.53	0.53				
UrAO	0.44	0.46	0.50	0.48		
MtW	0.51	0.56	0.54	0.52	0.59	0.48

6. Порівняння середніх за 24-й цикл візуально вимірних величин магнітних полів плям з розрахованими за записами поляриметрів TIP та FIRS. Ми об'єднали результати візуальних вимірювань у КАО з одночасно зробленими вимірюваннями в CrAO і UrAO. Такий масив містить 1250 вимірювань, проведених у 2009–2014 рр., і 1550 вимірювань за весь 24-й цикл. На відміну від об'єднаного нами в роботах [2, 4] індексу B_{sp} , повний масив вимірювань містить дані як невеликих, так і дуже великих плям, які виникають частіше в роки максимуму та на фазі спадання циклу сонячної активності. Чим більші напруженості магнітного поля, тим сильніша відмінність даних обсерваторії Маунт Вілсон від інших вимірювань, тому дані цієї обсерваторії слід розглядати окремо. У роботі [8] застосовано саме такий підхід. Тоді як візуально вимірні напруженості магнітного поля плям у MtW були від 13 до 32 сТл із середнім значенням 22 сТл, поляриметричні дані Tenerife Infrared Polarimeter (TIP) на German Vacuum Tower Telescope

та Facility Infrared Spectropolarimeter (FIRS) на Dunn Solar Telescope Gaussian були в межах 15–37 сТл із середнім 26.0 ± 0.2 сТл. Ми також для розрахунків брали магнітні поля плям, які перевищують поріг у 15 сТл – нижню 99 %-ву межу розподілу вимірювань у КАО. Середнє значення масиву даних і 2009 до 2014 р. у нас 25.1 ± 0.1 сТл і 25.2 ± 0.1 сТл за весь 24-й цикл. Хоча візуальні вимірювання показують достовірно нижчу величину магнітного поля, ніж поляриметричні у [8], цю різницю можна пояснити тим, що TIP і FIRS використовують інфрачервоні лінії, які формуються глибше, ніж Fe I 5250.2 Å та Fe I 6173.3 Å, де магнітне поле сильніше. Другою причиною розбіжності може бути інша методика формування вибірки. Хоча кількість плям у [8] приблизно така, як і в нашому дослідженні, схоже, що для розрахунків використано лише одне вимірювання кожної плями, у час максимального магнітного поля за дні спостережень. Результат усереднення таких вимірювань показує більшу величину модуля поля.

7. Розрахунок індексу B_{sp} . На рис. 4 бачимо, що зі збільшенням діаметра плям понад 60 кутових секунд (44 Мм) їх кількість значно зменшується, у роки мінімуму сонячної активності таких великих плям зовсім немає. З іншого боку, невеликі плями з діаметром менше за 30 кутових секунд (22 Мм) рідко показують справжню напруженість магнітного поля, передусім через замивання ядра світлом напівтіні при дрижання зображення. Через такі обмеження нами вибрано діапазон розмірів плям 22–44 Мм для моніторингу середньорічної напруженості магнітного поля плям B_{sp} за даними кількох обсерваторій [2, 4].

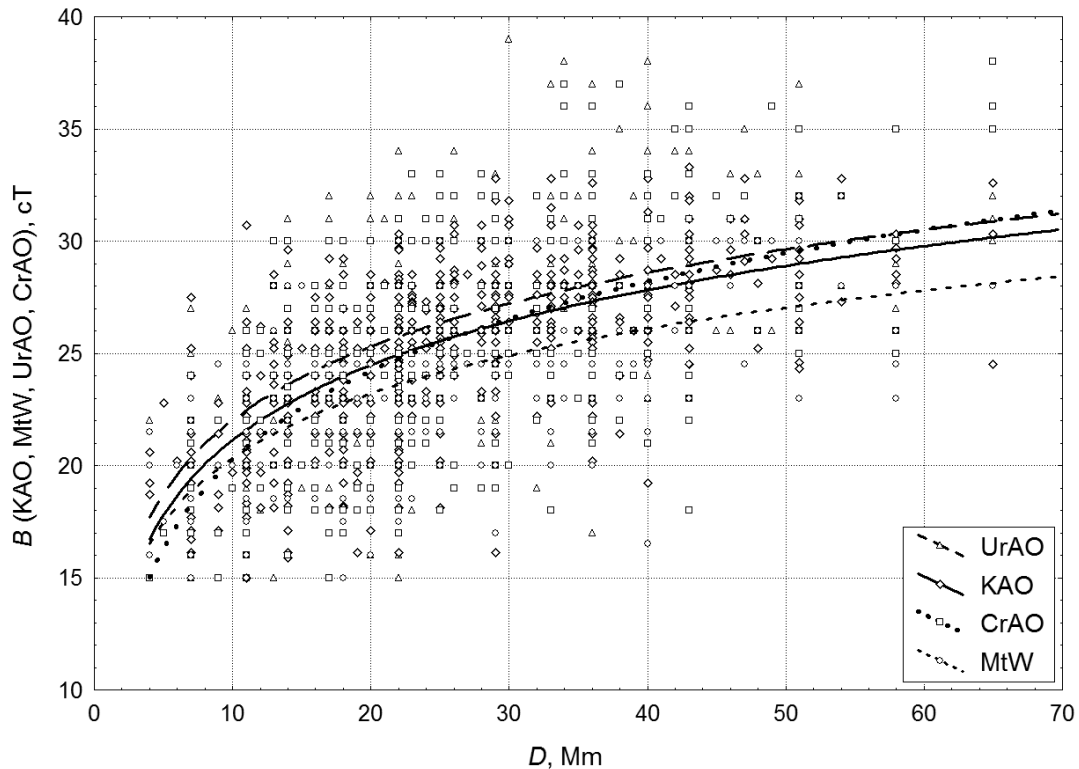


Рис. 4. Залежність вимірної величини магнітного поля в сонячних плямах від їхнього діаметра

На рис. 5 наведено хід індексу B_{sp} у 24-му циклі сонячної активності. Як і робота [8], наше дослідження підтверджує циклічність варіацій магнітних полів сонячних плям і спростовує твердження [3] про монотонне їх зменшення протягом 23-24-го циклів сонячної активності.

Кілька прогнозів сонячної та геомагнітної активності нами було зроблено в роботі [5], зокрема середній за 24-й цикл індекс B_{sp} передбачався 24.8 сТл. Цей прогноз справдився, оскільки середній у 2009–2018 рр. індекс B_{sp} виявився 24.9 ± 0.3 сТл. Це означає, що 24-й цикл, як і 23-й, не є магнітно слабким, його скоріше можна віднести до циклів з помірно сильним магнітним полем сонячних плям, що видно з роботи [2].

На рис. 5 бачимо, що магнітне поле плям у 24-му циклі було найбільшим через 2–3 роки після максимуму кількості плям. Запізнення змін магнітної активності на кілька років відносно варіацій кількості плям раніше було нами знайдено для 23-го циклу в дослідженні [4], а потім для 16-23-го циклів сонячної активності в роботі [2]. Цей факт пояснює виникнення більшості сильних спалахів у фазі спадання індексу кількості плям, що зумовлює сплески геомагнітної активності [5].

Також ця робота підтверджує дані [2], що фаза спадання напруженості магнітного поля сонячних плям значно коротша, ніж фаза росту. У 2018 р. візуальні вимірювання магнітних полів сонячних плям показали значне зменшення їхньої напруженості. Оскільки протягом року, наступного за роком мінімуму магнітних полів сонячних плям, зменшується модуляція галактичних космічних променів сонячним вітром, то у 2019 р. можна очікувати найбільший за кілька десятиліть потік ГКЛ.

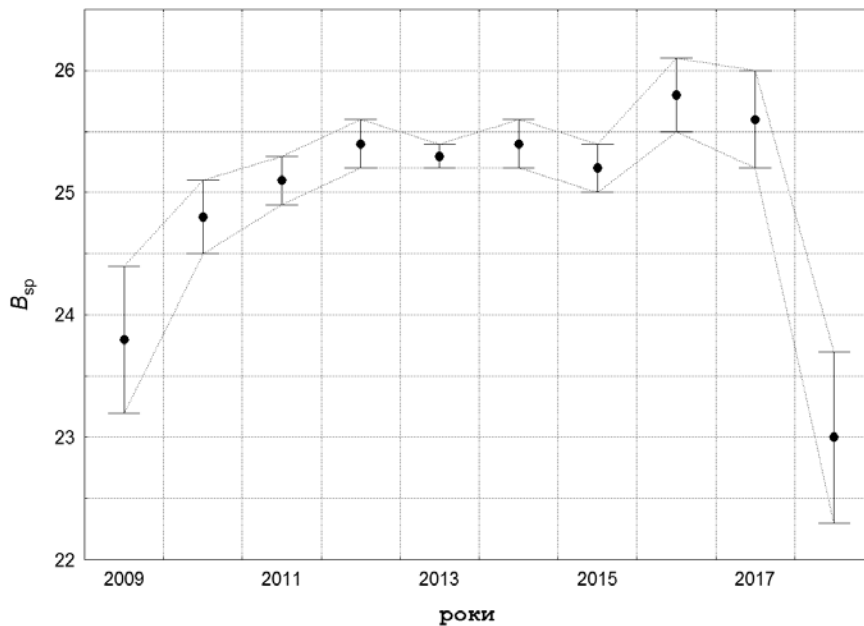


Рис. 5. Варіації B_{sp} -індексу модуля магнітних полів крупних сонячних плям з діаметром 22-44 за вимірюваннями в чотирьох обсерваторіях

8. Висновки. Отримано, що в 24-му циклі сонячної активності середні значення магнітного поля в трьох обсерваторіях УрАО, КраО і КаО були 26.0 ± 0.3 , 25.0 ± 0.2 і 25.2 ± 0.2 сТл, відповідно. Вони відрізняються між собою не більше, ніж на 3 стандартні похибки, тоді як обсерваторія Маунт Вілсон дає достовірно нижчі величини магнітного поля – 23.8 ± 0.1 сТл. Наше дослідження підтверджує висновки [8] про недооцінювання величини магнітного поля сонячних плям, виміряних у обсерваторії Маунт Вілсон. У роботі [8] середнє значення нормально розподілених величин магнітного поля за спостереженнями TIP і FIRS у 24-му циклі дорівнює 26.0 сТл, тоді як за даними MtW – на кілька сантисесла менше. Така розбіжність, підтверджена й нашою роботою, потребує нової калібровки вимірювань у Маунт Вілсон. Дані СтАО можна вважати еталонними для порівняння з ними результатів вимірювань магнітних полів плям в інших обсерваторіях [7].

Проведене дослідження заперечує твердження [3] про монотонне зменшення напруженості магнітних полів сонячних плям упродовж 23-го і 24-го циклів сонячної активності. Середній за 24-й цикл індекс B_{sp} магнітних полів сонячних плям розміром 22–44 Мм дорівнює 24.9 ± 0.3 сТл, що дозволяє віднести цей магнітний цикл до помірно сильних. Ми отримали, що варіації магнітного поля сонячних плям мають характерний для попередніх циклів пік на 2-3-й рік після максимуму кількості плям.

Зменшення магнітного поля сонячних плям у 2018 р. до 23 сТл дає підставу очікувати у 2019 р. найбільший за півстоліття спостережень рівень галактичних космічних променів.

Подяки. Автор дякує спостерігачам Сонця, завдяки яким щороку поповнюються ряди вимірювань сонячних магнітних полів, передусім, В. Г. Лозицькому, який виконав майже всі спостереження на ГСТ у КаО, Г. В. Лямовій – спостерігачу ГСТ УрАО; колективу спостерігачів на БСТ-2 КраО та учасникам синоптичної програми на 150-футовому сонячному телескопі обсерваторії Маунт Вілсон.

Список використаних джерел

1. Kiev university Astronomical observatory horizontal solar telescope / E. V. Kurochka, L. N. Kurochka, N. I. Lozitska et al. // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy. – 1980. – V. 22. – P. 48–56.
2. Krivodubskij V. N. Dependence of solar cycles duration on the magnitude of the annual module of the sunspots magnetic field / V. N. Krivodubskij, N. I. Lozitska // Proc. of the Intern. Astronomical Union, IAU Symposium. – 2013. – V. 294. – P. 71–72.
3. Livingston W. Decreasing sunspot magnetic fields explain unique 10,7 cm radio flux / W. Livingston, M. J. Penn, L. Svalgaard // The Astrophysical Journal Letters. – 2012. – V. 757. – Id. L8 (4 pp).
4. Lozitskaya N. I. The comparison of results of visual measurements of large sunspot magnetic field carried out in different observatories in solar cycle 23 / N. I. Lozitskaya, G. V. Lyamova, V. M. Malashchuk // Izvestiya Krymskoi Astrofizicheskoi Observatorii. – 2007. – V. 103. № 4. – P. 59-67.
5. Lozitska N. Sunspot group indices for long-term prediction of geomagnetic activity / N. Lozitska, V. Efimenko // Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Astronomy. – 2015. – V. 52. – P. 43–47.
6. Methodical problems of magnetic field measurements in umbra of sunspots / N. I. Lozitska, V. G. Lozitsky, O. A. Andryeyeva et al. // Advances in Space Research. – 2015. – Vol. 55, Iss.3. – P. 897-907.
7. Malaschuk V. M. Research of the measured magnetic field oscillations in the leading spot of the group NOAA 11504 on observations of June 18, 2012 / V. M. Malaschuk, N. I. Lozitskaya, O. V. Lozitsky // Izvestiya Krymskoi Astrofizicheskoi Observatorii. – 2013. – V. 109. – № 2. – P. 98–103.
8. Variation in sunspot properties between 1999 and 2014 / R. Rezaei, C. Beck, A. Lagg et al. // Astron. Astrophys. – 2015. – V. 578, id. A43 (9 pp).

Надійшла до редколегії 13.11.18

N. Lozitska, PhD,
Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv

SUNSPOT MAGNETIC FIELDS IN 24 CYCLE OF SOLAR ACTIVITY

The data of visual measurements of the magnetic field in sunspots umbra, obtained in four observatories during 24 cycles of solar activity, are compared. Magnetic field strength modules with averaging over each observatory are analyzed. The measurements taken in the Astronomical Observatory of the University of Kyiv (KAO) were used as base, where 170 spots were measured on average 4 times each at intervals of one to two days

during the group passing through the solar disk. Measurements of the Ural, Crimean and Mount Wilson Observatory, performed within 24 hours of observation in the KAO, are used in the study. It was found that the average value of the magnetic field per cycle, obtained from the data of three observatories UrAO, CrAO and KAO, was 26.0 ± 0.3 , 25.0 ± 0.2 and 25.2 ± 0.2 cT, respectively. They differ by no more than 3 standard errors, while the Mount Wilson Observatory gives a significantly lower magnetic field – 23.8 ± 0.1 cT. This result is confirmed by the work of R. Rezaei et al., 2015, which compares the visual measurements in Mount Wilson with Tenerife Infrared Polarimeter (TIP) and Facility Infrared Spectropolarimeter (FIRS) for the 23rd and 24th cycle of solar activity. The average magnetic field value for observations of TIP and FIRS in 24 cycles is 26.0 cT, which is slightly higher than we obtained from the visual observations of three observatories, while MtW shows a few centitesla less. The mean square error of the average per cycle of the magnetic field, based on the data of TIP and FIRS is 0.2 cT, so the difference with the MtW is reliable. An understatement of the measured intensity of the magnetic field of the spots requires a revision of the measurement calibration in Mount Wilson. The data of the Crimean Astrophysical Observatory can be considered reference for subsequent comparisons with the results of observations of other observatories.

For the calculation of the annual index B_{sp} of magnetic fields of sunspot size 22-44 Mm, the data of visual measurements of all 4 observatories are traditionally used. We have found that variations in the magnetic field of sunspots are the same as in previous cycles: the peak occurs in the second-third years after the maximum number of spots. The average for the 24 cycle B_{sp} index is 24.9 ± 0.3 cT, which allows us to consider this magnetic cycle as moderately strong. Reduction of the sunspots magnetic field in 2018 to 23 cT allows it to expect in 2019 the highest near-ground level of galactic cosmic rays in the last half century.

Keywords: solar activity, magnetic fields, sunspots, galactic cosmic rays.

Н. Лозицкая, канд. физ.-мат. наук,

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В 24-М ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Сравниваются данные визуальных измерений максимального магнитного поля в тени солнечных пятен, полученные в четырех обсерваториях в течение 24-го цикла солнечной активности. Анализируются модули напряженности магнитного поля. Базовыми в исследовании взяты измерения в Астрономической обсерватории Киевского университета (КАО), где в 2009–2018 гг. измерено магнитное поле 170 пятен, в среднем 4 раза каждое с интервалом в один или двое суток за прохождение группы по диску Солнца. В исследование включены измерения Уральской, Крымской и обсерватории Маунт Вилсон, выполненные в пределах 24 часов от времени наблюдений в КАО. Средние за цикл значения магнитного поля, полученные по данным трех обсерваторий, УРАО, КРАО и КАО, составляли 26.0 ± 0.3 , 25.0 ± 0.2 и 25.2 ± 0.2 cT, соответственно. Они отличаются между собой не более чем на 3 стандартные ошибки, тогда как обсерватория Маунт Вилсон дает достоверно ниже среднее магнитное поле – 23.8 ± 0.1 cT. Этот результат подтверждает выводы работы R. Rezaei et al., 2015, где сравниваются визуальные измерения в Маунт Вилсон с данными спектрополяриметров Tenerife Infrared Polarimeter (TIP) и Facility Infrared Spectropolarimeter (FIRS) за 23-й и неполный 24-й циклы солнечной активности. Среднее значение магнитного поля по наблюдениям TIP и FIRS в 24-м цикле равно 26.0 cT, что немного выше полученного нами из визуальных наблюдений трех обсерваторий, тогда как среднее значение по данным MtW на несколько сантитесла меньше. Среднеквадратичная ошибка среднего за цикл магнитного поля по данным TIP и FIRS составляет 0.2 cT, поэтому разница с MtW достоверна. Занижение измеренной напряженности магнитного поля в Маунт Вилсон требует пересмотра калибровки измерений. Данные Крымской астрофизической обсерватории можно считать эталонными для последующих сравнений с ними результатов наблюдений других обсерваторий.

Для вычисления ежегодного индекса B_{sp} магнитных полей солнечных пятен размером 22-44 Мм традиционно использованы данные визуальных измерений всех четырех обсерваторий. Получено, что вариации магнитного поля солнечных пятен имеют характерный для предыдущих циклов пик на второй – третий год после максимума количества пятен. Средний за 24-й цикл индекс B_{sp} равен 24.9 ± 0.3 cT, что позволяет рассматривать этот магнитный цикл как умеренно сильный. Уменьшение магнитного поля солнечных пятен в 2018 г. до 23 cT дает основание ожидать в 2019 г. наибольший за полвека приземный уровень галактических космических лучей.

Ключевые слова: солнечная активность, магнитные поля, солнечные пятна, галактические космические лучи.

УДК 523.982

М. Пішкало, канд. фіз.-мат. наук,

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка

ЗМІНА ЗНАКА ПОЛЯРНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОНЦЯ У 24-МУ ЦИКЛІ АКТИВНОСТІ

Досліджено зв'язок сонячної активності, вираженої числами Вольфа, у північній і південній півкулях Сонця в поточному, 24-му циклі, з часом зміни знака полярного магнітного поля у відповідній півкулі. Показано, що зміна знака магнітного поля на полюсі не збігається з максимумом активності в кожній з півкуль. У північній півкулі максимум чисел Вольфа спостерігається майже на півтора роки раніше від першої переполюсовки на полюсі й на два з половиною роки раніше від третьої, остаточної. У південній півкулі максимум чисел Вольфа спостерігається майже на рік раніше від зміни знака поля на полюсі. У північній півкулі зміни знака магнітного поля на полюсі відбуваються в період максимальних значень нахилу геліосферного струмового шару, а в південній – майже через два роки після відповідного максимуму.

Вступ. Як відомо, напруженість полярного магнітного поля Сонця є мінімальною в епохи максимумів активності та максимальною – в епохи мінімумів активності. Саме в епохи максимумів сонячної активності знак полярного магнітного поля змінюється на протилежний, відбувається так звана переполюсовка глобального магнітного поля Сонця. Два 11-річних цикли утворюють 22-річний магнітний цикл, або цикл Гейла.

Процес зміни знака полярного магнітного поля відбувається за власним сценарієм у кожній з півкуль, північній чи південній, і в кожному циклі активності. Зазвичай моменти переполюсовок магнітного поля в північній і південній півкулях не збігаються [9]. Іноді переполюсовка може бути трикратною: спочатку "перемагає" нове поле, потім на деякий час знову верх бере "старі" поле, і, нарешті, "нове" поле "перемагає" повністю на наступні 11 років.

Бєбок [3] першим повідомив за спостереженнями полярних магнітних полів у 19-му циклі про неодноразовість зміни знака поля в різних півкулях: у південній півкулі переполюсовка відбулася майже на 18 місяців раніше, ніж у північній.

Макаров і Сівараман [5, 6] дослідили зміну знака поля в 11–22-му циклах і дійшли висновку, що потрійні переполюсовки спостерігалися у 16-му, 19-му і 20-му циклах активності в північній півкулі, а в циклах 12 і 14 – у південній.

У роботах [1, 4, 8, 10] було показано, що в 21–23-му циклах активності всі переполюсовки були однократними.

У нашій попередній роботі [2] було детально досліджено динаміку зміни сумарного магнітного поля в різних приполярних зонах Сонця у 24-му циклі сонячної активності й визначено моменти часу, коли магнітне поле змінює знак безпосередньо на полюсах. Було також показано, що в північній півкулі відбулася трикратна зміна знака магнітного поля, а в південній – однократна, і визначені епохи зміни знака поля на полюсах.