



ЩУКІНА

Наталія Геннадіївна — член-кореспондент НАН України, доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу фізики Сонця Головної астрономічної обсерваторії НАН України

МОНІТОРИНГ ВАРІАЦІЙ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СОНЦЯ З 11-РІЧНИМ ЦИКЛОМ АКТИВНОСТІ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 31 травня 2017 року

Описано спостережну програму моніторингу довгострокових змін сонячних спектральних ліній. Метою програми є з'ясування того, як фізичні параметри спокійної атмосфери Сонця змінюються протягом 11-річного циклу активності. Спостереження майже 40 ліній нейтральних та іонізованих хімічних елементів здійснюються з 2012 р. на горизонтальному сонячному телескопі АЦУ-5 Головної астрономічної обсерваторії НАН України. Результати моніторингу свідчать, що глибина і ширина більшості ліній у спектрі спокійних ділянок поверхні Сонця корелює зі зміною його загального магнітного поля. Поведінку зазначених параметрів можна пояснити варіаціями температури і поля конвективних швидкостей глибоких шарів спокійної атмосфери Сонця з 11-річним циклом сонячної активності.

Ключові слова: Сонце, телескопи, прилади для спостережень, спектральні лінії, магнітне поле Сонця, 11-річний цикл сонячної активності.

Цикли сонячної активності

Еволюція Сонця на масштабах часу в мільярди років. Сонце — найближча до нас зоря, випромінювання якої є джерелом життя на Землі. За спектральною класифікацією Сонце належить до зір малої і середньої маси, так званих жовтих карликів типу G2V. Це звичайна зоря з високим вмістом металів, що утворилася із залишків кількох вибухів наднових. Згідно з прийнятими на сьогодні моделями зоряної еволюції, його вік становить близько 4,57 млрд років. Зараз Сонце перебуває приблизно в середині свого життєвого циклу.

Наша зоря — саморегулювальний термоядерний реактор, що забезпечує тривале і стабільне виробництво енергії. Найважливіша реакція — перетворення водню на гелій у ядрі Сонця — триває найдовше (мільярди років). У міру вичерпання запасів водню Сонце стає все гарячішим, а його світність все вищою. Приблизно через мільярд років вона зросте на 10%, і поверх-

ня Землі внаслідок парникового ефекту стане надто гарячою для нині існуючих форм життя. Незважаючи на це, живі організми можуть зберегтися в океанах і в полярних областях. У віці приблизно 12,2 млрд років ядро Сонця розігріється настільки, що почнеться процес горіння водню в його тонкому зовнішньому шарі. Це призведе до розширення зовнішньої оболонки більш ніж у 250 разів порівняно з сучасним радіусом і до збільшення світності у понад 2 тис. разів. Унаслідок цього Сонце стане червоним гігантом. У наступні десятки мільйонів років почнеться термоядерне «горіння» гелію, яке супроводжуватиметься потужними спалахами і подальшим збільшенням світності. Ці спалахи приведуть до того, що зовнішні шари Сонця утворять планетарну туманність. У центрі її залишиться дуже гарячий і щільний білий карлик розміром приблизно із Землю та з температурою поверхні 120 000 К, але протягом багатьох мільярдів років він поступово охолоне і згасне.

Поряд з цими варіаціями світності Сонця є варіації світності на шкалах від сотень тисяч до сотень мільйонів років, а також вікові, з періодом від ста до ста тисяч років, та короткоперіодичні, з періодом 11 років.

Є кілька індексів, що характеризують цю циклічність. Це, по-перше, сонячна стала, по-друге, числа Вольфа W (відносне число плям на Сонці), а також вміст радіоактивного ізотопу вуглецю-14 та інших ізотопів (таких як берилій-10) у льодовиках, деревах і осадових породах. Нагадаємо, що сонячна стала — це кількість енергії, що проходить через площадку 1 м^2 , перпендикулярну до сонячного проміння. На відстані в одну астрономічну одиницю (149,6 млн км) ця стала дорівнює $\sim 1370 \text{ Вт/м}^2$.

Варіації Сонця на тимчасових інтервалах 100 тис. — 100 млн років можуть бути зумовлені нестационарними процесами в його ядрі та в конвективній зоні. З цим, імовірно, пов'язані основні льодовикові періоди Землі. Дійсно, проміжок часу між головними льодовиковими епохами становить близько $3 \cdot 10^8$ років, а тривалість основних льодовикових епох близька до 10^7 років. Утім, зміни клімату можуть мати

і галактичне походження, пов'язане з проходженням Сонячної системи через спіральні рукави Чумацького Шляху з періодом приблизно 250 млн років. При цьому перетинання рукавів є квазіперіодичним, з інтервалом, кратним 10^7 років. Не можна відкидати і «земне джерело» кліматичних змін — рух тектонічних плит, гороутворювальні процеси, інтенсифікацію вулканізму та ін.

Варіації світності Сонця на шкалі часу менш ніж 100 тис. років найімовірніше спричинені періодичними змінами сонячної конвективної зони, які зумовлені взаємодією гарячого газу, що рухається, з магнітними полями. Сучасні кліматологи вважають, що саме з цією змінністю Сонця можна пов'язати зміни клімату Землі протягом сотень і тисяч років. Зокрема, Рудольф Вольф (Johann Rudolf Wolf), Густав Шперер (Gustav Spörer) і Едвард Маундер (Edward Maunder) виявили винятково низьку сонячну активність між 1645 і 1715 рр. Це явище має назву *мінімум Маундера*. У цей період сонячна стала знизилася на 0,2%, або приблизно на 3 Вт/м^2 . Серед інших подібних періодів низької активності слід згадати мінімуми Вольфа (1280–1340 рр.), Шперера (1450–1540 рр.) і Дальтона (1790–1830 рр.). Реконструкція даних про варіації сонячної сталої з 1610 по 2010 рр. [1, 2] свідчить, що вони добре корелюють зі змінами числа сонячних плям, а також із вмістом радіоактивних ізотопів у рослинах та крижаних кернах.

Мінімуми Маундера, Шперера і Дальтона збігаються в часі з найхолоднішою фазою глобального похолодання клімату в XV–XIX ст. (так званий малий льодовиковий період).

Найвідоміший 11-річний цикл сонячної активності характеризується передусім відносним числом сонячних плям (числа Вольфа), усереднених за рік. Відповідальним за цей цикл є глобальне магнітне поле Сонця, що генерується за допомогою механізму магнітного динамо в тахокліні (тонкий шар між променевою та конвективною зонами Сонця). На початку циклу плям практично немає, далі за 3–7 років їх число швидко зростає до 50–200, після чого протягом 5–7 років повільно змен-

шується. Упродовж 11-річного циклу спостерігається поступове зміщення зони утворення сонячних плям до екватора (закон Шперера). До речі, 11-річним цикл називають умовно: його тривалість в XVIII–XX ст. змінювалася від 7 до 17 років, а в XX ст. у середньому була ближчою до 10,5 років.

На періодичність у поведінці сонячних плям уперше вказав у 1844 р. у своїй статті німецький астроном-любитель Хейнріх Швабе (Samuel Heinrich Schwabe). Через три роки ця робота привернула увагу іншого німецького астронома — Рудольфа Вольфа, який почав власні спостереження плям і ввів індекс їх кількості, названий його ім'ям. Зараз періодичність зміни числа плям має назву *закон Швабе–Вольфа*. З урахуванням магнітної активності виділяють також подвоєний цикл Швабе–Вольфа тривалістю близько 22 років (так званий цикл Хейла), маючи на увазі, що стан глобального магнітного поля Сонця повертається до початкового через два повних 11-річних цикли. За допомогою індексу Вольфа 11-річні цикли умовно нумерують, починаючи з 1755 р. Зараз спостерігається 24-й цикл активності. Його початок відносять приблизно до 2009 р.

Другий індекс, який використовується для опису 11-річного циклу активності, — сонячна стала. За даними космічних спостережень, кілька останніх 11-річних циклів сонячна стала змінюється в середньому на 0,1%, або на 1,3 Вт/м². Варіації сонячної сталої добре корелюють з числом плям, спалахів, корональних викидів мас (Coronal Mass Ejection — CME), а також із потужністю сонячного радіовипромінювання.

Сонячна активність і її вплив на Землю

Сонячна активність через міжпланетне середовище впливає на Землю, а саме, на іоносферу, магнітосферу, радіаційні пояси і озоновий шар. До числа її проявів належить ультрафіолетове і рентгенівське випромінювання Сонця, сонячний вітер, викиди речовини під час спалахів і корональні викиди маси.

Ультрафіолетове і рентгенівське випромінювання, досягаючи Землі за 8 хв, іонізують її атмосферу і руйнують озоновий шар. Високоенергетичні заряджені частинки приблизно через 100 хв іонізують верхню атмосферу і змінюють геомагнітне поле. Викиди речовини під час сонячних спалахів і CME через 1,5–2 доби призводять до геомагнітних бур. Помірні бурі (з планетарним індексом $Kp = 6$) відбуваються з частотою приблизно одна в тиждень, а найсильніші бурі ($Kp = 9$) трапляються набагато рідше — раз на 2–3 роки.

Екстремально потужні магнітні бурі можуть призводити до руйнування енергетичних систем і пошкодження трансформаторів (відключення електропостачання у Квебеку в 1989 р.). Вони впливають на космічні апарати, створюючи великий поверхневий заряд і спричиняючи їх прискорене гальмування. При цьому виникають проблеми з орієнтацією, зв'язком і системами стеження. Під час бур є ймовірність отримання небезпечних для здоров'я космонавтів і авіапасажирів радіаційних доз.

Мішенями магнітної бурі стають легені, кровоносна, серцево-судинна і вегетативна нервова системи людини. Більша частина інфарктів та інсультів трапляється саме під час магнітних бур. Основними групами ризику є хворі з патологією серцево-судинної системи (особливо ті, які перенесли інфаркт міокарда), здорові люди з функціональним перенапруженням (космонавти, пілоти трансконтинентальних рейсів, оператори і диспетчери енергетичних станцій, аеропортів тощо), а також діти в період розвитку з несформованою адаптаційною системою.

Через сонячну активність відбуваються збої мобільного і супутникового зв'язку, комп'ютерних систем, спотворення радіохвиль і порушення радіозв'язку, а також ускладнення в роботі аеропортів. Спостерігається кореляція сонячної активності з рядом природних і соціальних явищ (зі зміною рівня ґрунтових вод, повторюваністю посух, ураганів, числом землетрусів, виникненням епідемій, зростанням злочинності тощо).

Починаючи з 1900 р. збитки від різного роду катастроф, пов'язаних із сонячною активністю, оцінюються у трильйони доларів. Мільйони людей стали жертвами природних катаклізмів. Щоб завчасно передбачити вплив сонячної активності на біосферу та соціально-економічну систему Землі, необхідно проводити моделювання космічної погоди, яке неможливе без моніторингу глобальних змін Сонця на довготривалих масштабах часу.

Довготривалі програми моніторингу варіацій Сонця

Попередні програми моніторингу. Перші програми моніторингу, спрямовані на вивчення довгострокових змін фраунгоферового спектра Сонця, відносяться до середини 50-х років ХХ ст. Огляд деяких з них можна знайти в монографії Атрощенко та ін. [3]. Більшість цих програм були основані на спостереженнях, тривалість яких не перевищувала один або два роки (наприклад [4]). Як виняток, слід згадати кілька програм довгострокового моніторингу сонячних спектральних ліній. Так, у 1984 р. Крат і Кохан [5] опублікували результати 11-річних спостережень центр–край окремих фраунгоферових ліній. Вони виявили, що параметри деяких ліній можуть змінюватися з циклом сонячної активності. Дойль та ін. [6] протягом 1978–1993 рр. вивчали зміни ліній $Mn\ I\ 539,5\ \text{nm}$ і $Ca\ II\ H\ 393,3\ \text{nm}$ у спектрі Сонця, інтегрованому по всьому диску (спектр Сонця як зорі). Близько 40 років Лівінгстон зі співавторами [7–9] спостерігали лінії у спектрі Сонця як зорі. У список цих ліній увійшли лінії, що утворюються як у хромосфері (Na , $Ca\ II\ K\ \&\ H$, $CN\ 388,3\ \text{nm}$, $Ca\ II\ 854,2\ \text{nm}$, $He\ I\ 1083\ \text{nm}$), так і у фотосфері ($Fe\ I\ 537,958\ \text{nm}$, $C\ I\ 538,032\ \text{nm}$, $Ti\ II\ 538,103\ \text{nm}$). Деякі з них спостерігалися також у центрі сонячного диска.

Сучасні програми моніторингу. Зараз виконуються дві програми довготривалого моніторингу варіацій Сонця, а саме:

1) американська спостережна програма SOLIS (Synoptic Optical Long-Term Investigations of the Sun) [10, 11]; для її виконання

з 2006 р. задіяно спеціалізований вакуумний сонячний телескоп Національної обсерваторії Кітт-Пік (Kitt Peak National Observatory);

2) українська спостережна програма моніторингу сонячних спектральних ліній, що утворюються в спокійних (незбурених) областях сонячної атмосфери. Ця програма виконується на горизонтальному сонячному телескопі АЦУ-5 Головної астрономічної обсерваторії НАН України (ГАО НАНУ) починаючи з 2012 р.

Синоптичні оптичні дослідження Сонця за програмою SOLIS — це автоматичні довгострокові спостереження спектральних ліній і магнітних полів, усереднених по диску (спостереження Сонця як зорі). Їх кінцевою метою є краще розуміння сонячної активності та її впливу на клімат і атмосферу Землі.

Слід зазначити, що такого роду спостереження не дозволяють виділити як окрему компоненту варіації фізичних параметрів спокійної атмосфери Сонця. На сьогодні немає переконливих доказів їх існування [7–9], оскільки варіації спокійного Сонця майже на порядок менші за варіації Сонця як зорі. При цьому вони, як правило, перебувають на рівні шумів сучасних спостережень.

Завдання української програми моніторингу якраз і полягає в тому, щоб виявити й дослідити такого роду варіації. Результати, які передбачається одержати під час моніторингу варіацій фізичних параметрів спокійної атмосфери Сонця з 11-річним циклом, мають винятково важливе значення для вирішення глобальних проблем фізики Сонця, таких як проблема внутрішньої будови і еволюції Сонця та його магнітної активності, проблема енергетичної взаємодії фотосфера — хромосфера — корона та нагрівання останніх, механізми збудження еруптивних явищ на Сонці, причини циклів сонячної активності та ін. Інформація про стан сонячної атмосфери допоможе вжити оперативних заходів для запобігання негативному впливу проявів сонячної активності на здоров'я людини і діяльність суспільства, що може дати державі значний соціальний та економічний ефект.

Телескоп АЦУ-5 Головної астрономічної обсерваторії НАН України

Основні складові телескопа АЦУ-5. Телескоп АЦУ-5 призначений для спостережень фраунгоферового спектра Сонця з високою точністю. Телескоп було введено в експлуатацію в 1966 р. До його складу входять:

- целостатна установка з двома плоскими дзеркалами діаметром 44 см (рис. 1);
- головне (діаметр 44 см, фокус 17,5 м) та діагональне дзеркала;
- спектрограф закритого типу АСП-20 з дифракційною ґраткою (140×150 мм, 600 штрихів/мм) та дзеркалом діаметром 50 см і фокусом 7 м (рис. 2);
- система реєстрації спектра в режимі однократного проходження з приладом із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) (Charge-Coupled Device — CCD) SBIG ST-8300M (3326 × 2504 пікселів розміром 5,4 мкм) з термоохолодженням;
- система фотоелектричної реєстрації спектра в режимі подвійного проходження з фотоелектричним помножувачем (ФЕП) (Photoelectric Multiplier — PEM) фірми ЕМІ;
- веб-камера для візуального контролю стану хмарності неба;
- комплект для роботи в режимі подвійного проходження (екер на рухомій каретці, додаткове перехоплювальне дзеркало);

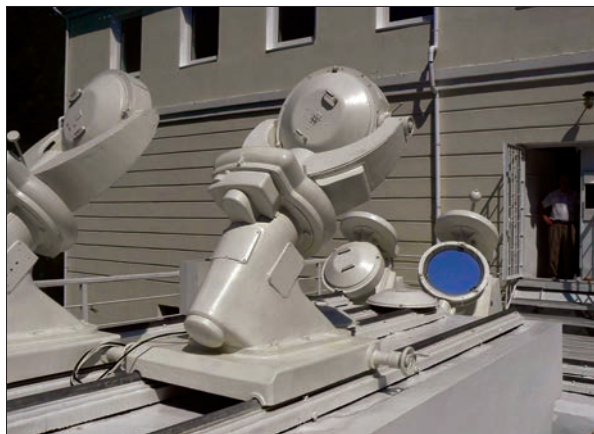


Рис. 1. Целостатна установка телескопа АЦУ-5 Головної астрономічної обсерваторії НАН України

- апаратний комплекс (система керування целостатом, наведення спектра, керування веб-камерою);

- вузол калібровки спектрографа на основі He—Ne лазера ЛГН-302.

Детальний опис телескопа можна знайти в роботах Гуртовенка, Костика, Щукіної [12, 13] та Осіпова [14].

Використання телескопа в наукових дослідженнях. З 1966 р. горизонтальний сонячний телескоп АЦУ-5 ГАО НАНУ був задіяний у виконанні кількох спостережних проектів.

Серед з них як найважливіші слід згадати такі:

- «Варіації центр—край інтенсивності вибраних фраунгоферових ліній Сонця»;
 - «Вимірювання сонячної радіації в абсолютних енергетичних одиницях»;
 - «Геліосейсмологічні спостереження Сонця за допомогою космічного апарата КОРОНАС».
- Дані спостережень на сонячному телескопі АЦУ-5 ГАО НАНУ також були використані в таких міжнародних проектах:
- INTAS — High-Resolution Physics of the Solar Photosphere (Фізика сонячної фотосфери високої роздільної здатності);
 - Magnetismo Solar y Espectropolarimetria en Astrofísica (Сонячний магнетизм та спектрополяриметрія в астрофізиці);
 - Solar Spectropolarimetry (Сонячна спектрополяриметрія);
 - Numerical Simulation of Astrophysical Processes (Чисельне моделювання астрофізичних процесів).

Учасниками цих проектів були закордонні партнери з Астрономічного інституту (Sterrekundig Instituut) (Утрехт, Нідерланди), Інституту земного магнетизму, іоносфери і поширення радіохвиль РАН (ІЗМІРАН), Інституту астрофізики на Канарських островах (Instituto de Astrofísica de Canarias) (Ла Лагуна, Тенеріфе, Іспанія), Центру плазмової астрофізики (Center for Plasma Astrophysics) (Левен, Бельгія), Інституту фізики Сонця при Стокгольмському університеті (Institute for Solar Physics, Department of Astronomy, Stockholm University, AlbaNova University Centre).



Рис. 2. Головне дзеркало телескопа АЦУ-5 та спектрограф

Під час виконання цих програм отримано ряд важливих наукових результатів:

1) побудовано самоузгоджену систему сил осциляторів близько 2000 спектральних ліній 49 хімічних елементів, яка широко використовується в тих галузях астрофізики, де проводиться кількісний спектральний аналіз [12, 15, 16];

2) побудовано спектрофотометричну модель випромінювання Сонця в абсолютних енергетичних одиницях [17, 18], яка використовується в астрофізиці, метеорології, геофізиці та аеронавтиці для вирішення комплексу прикладних завдань при моделюванні взаємодії сонячного випромінювання і земної атмосфери, при створенні імітаторів сонячного випромінювання і спектрофотометричних стандартів;

3) за допомогою спостережень на телескопі АЦУ-5 здійснювалося налагодження телескопів серії ДИФОС для позаатмосферних досліджень глобальних коливань яскравості Сонця. Ці коливання містять інформацію про внутрішню будову Сонця. Телескопи ДИФОС [19, 20] були виведені на навколосонячну орбіту й успішно працювали на борту міжнародних космічних станцій КОРОНАС-І (1994 р.) та КОРОНАС-Ф (2001–2005 рр.);

4) отримані зі спостережень дані про атомні параметри (сили осциляторів, стала загасання) спектральних ліній різних хімічних елементів, а також про їх асиметрію і зміщення, стали основою для побудови напівемпіричної

тривимірної моделі [21–27] атмосфери Сонця (температура, тиск, поле швидкостей). Модель передбачила існування раніше невідомих особливостей поведінки ліній поглинання у спектрі Сонця, які потім були відкриті при спостереженнях;

5) встановлено, що сонячні спалахи охоплюють не лише хромосферу, як вважалося раніше, а й усю товщину фотосфери. Збудження під час спалаху поширюються з корони і хромосфери у фотосферу і супроводжуються коливаннями магнітного поля [28, 29];

6) показано [30, 31], що енергія турбулентних магнітних полів у спокійній атмосфері Сонця може бути істотно більшою, ніж передбачалося раніше. Цієї енергії достатньо для нагрівання хромосфери і корони. Цей результат має надзвичайно важливе значення для вирішення актуальної проблеми першоджерел накопичення та переносу енергії з нижніх шарів атмосфери Сонця;

7) досліджено хімічний склад Сонця та зір на різних етапах еволюції Всесвіту [32–40]. Отримані результати мають важливе значення для розв'язання таких фундаментальних питань астрофізики, як походження Всесвіту та його еволюція; еволюція галактик та зір; внутрішня будова зір; структура і динаміка зоряних атмосфер;

8) створено ефективне програмне забезпечення для розв'язання багаторівневих задач



Рис. 3. Будівля телескопа АЦУ-5



Рис. 4. Відкриття телескопа АЦУ-5 після реконструкції; справа наліво: академік НАН України Я.С. Яцків, президент НАН України академік Б.Є. Патон, чл.-кор. НАН України Н.Г. Щукіна. Головна астрономічна обсерваторія НАН України, 21 червня 2011 р.



Рис. 5. Наукова команда Головної астрономічної обсерваторії НАН України: директор — академік НАН України Я.С. Яцків, завідувач відділу фізики Сонця чл.-кор. НАН України Н.Г. Щукіна; співробітники відділу — чл.-кор. НАН України Р.І. Костик, кандидат фіз.-мат. наук С.М. Осіпов

переносу випромінювання в багатовимірних середовищах [35, 41]. Розроблені програми можна використовувати в будь-якому науковому закладі, де проводять аналіз спектральних ліній.

Наукові роботи, в яких використовувалися дані, отримані на телескопі АЦУ-5, широко цитуються в міжнародних журналах з високим імпаکت-фактором (дані за 2016 р.): *Nature* (11,57), *Astrophysical Journal* (5,909), *Astronomy and Astrophysics* (5,185), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (4,9), *Solar Physics* (2,862), *Astronomy Reports* (0,805). Сумарний індекс цитування цих робіт дорівнює 1700 (враховано тільки роботи з індексом цитування не менш як 10).

Реконструкція телескопа АЦУ-5. У 2011 р. завершився ремонт будівлі (рис. 3), де розміщується телескоп, і відбулося його урочисте відкриття (рис. 4, 5). У 2011–2012 рр. було виконано реконструкцію телескопа, вдосконалено його апаратно-програмний комплекс, придбано сучасну ПЗЗ-камеру SBIG ST-8300M з термоохолодженням. Після реконструкції телескопу АЦУ-5 присвоєно ім'я його творця — професора Ернеста Гуртовенка (1928–1994 рр.).

Особливостями телескопа і спектрографа АЦУ-5 є:

- висока спектральна роздільна здатність $R = \lambda/\Delta\lambda \approx 430\,000$ (λ — довжина хвилі);
- довготривала метрологічна стабільність, що дозволяє реєструвати з мінімальною похибкою найменші варіації параметрів спектральних ліній на великих часових шкалах (роки), завдяки чому стає можливим виявляти варіації центральної глибини спектральної лінії — близько 0,1%, бісектора — менш як 10 м/с, еквівалентної ширини і півширини — менше 1 мÅ (10^{-11} см).

Висока якість реєстрації спектра на телескопі АЦУ-5 забезпечується завдяки використанню розробок, виконаних у відділі фізики Сонця ГАО НАНУ, а саме:

- унікальна система калібровки спектрографа. За допомогою спеціального пристрою є можливість протягом спостережного дня кілька разів вимірювати профіль інструменталь-

ного контуру на довжині хвилі 632,3 нм лазера ЛГН-302 (на інших телескопах це роблять не частіше, ніж один раз на рік);

- унікальна методика редукції за вплив інструментального контуру, яка враховує часткову когерентність сигналу і зміну профілю при переході до інших довжин хвиль (цього немає на жодному подібному телескопі);

- унікальна система термозахисту (закритий тип спектрографа, подвійна повітряна подушка в стінах павільйону), внаслідок чого спектрограф має напрочуд малі паразитні променеві швидкості: 4–5 м/с при експозиціях 2 с;

- нові програмні коди для обробки результатів спостереження атмосфери Сонця.

Завдяки високій спектральній роздільній здатності та довготривалій метрологічній стабільності телескоп АЦУ-5 після реконструкції став унікальним науковим об'єктом, якнайкраще пристосованим для моніторингу спокійного Сонця.

Результати моніторингу варіацій фізичних параметрів спокійного Сонця на телескопі АЦУ-5

Спостереження спектральних ліній у 2012–2017 рр. Джерелом даних про ці варіації є довготривалі (протягом 11-річного циклу сонячної активності) спостереження змін параметрів фраунгоферових ліній у спектрі спокійних ділянок сонячної поверхні, напівемпіричне і теоретичне моделювання на основі тривимірних магнітогідродинамічних моделей атмосфери Сонця.

Список спостережуваних спектральних ліній містить майже 40 ліній нейтральних та іонізованих хімічних елементів (H I, C I, Ca I, Ca II, Cr I, Mn I, Ti II, Fe I, Fe II, Ni I) у дев'яти спектральних областях від 393 до 657 нм (393,0–393,7; 524,4–525,2; 532,0–532,8; 537,6–538,5; 539,0–539,8; 558,4–559,2; 624,9–625,7; 632,6–633,3; 655,3–657,3 нм). Область утворення цих ліній охоплює більшу частину фотосфери, температурний мінімум і нижню хромосферу. Спектральні лінії спостерігаються в центрі сонячного диска, а також на лімбі поблизу пів-

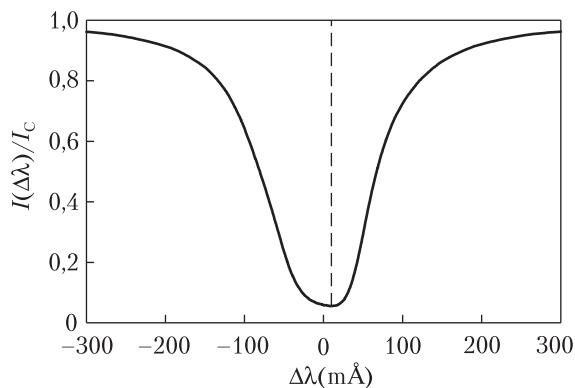


Рис. 6. Центральна глибина D профілю спектральної лінії (штрихова лінія)

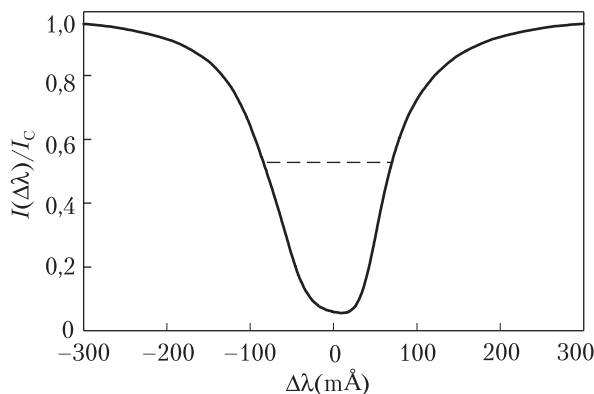


Рис. 7. Ширина профілю спектральної лінії $FWHM$ (штрихова лінія)

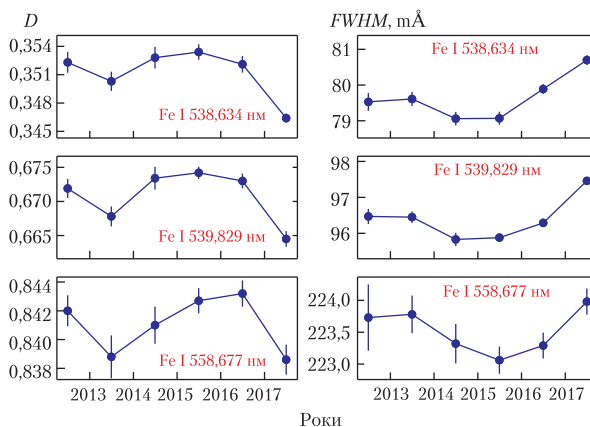


Рис. 8. Варіації центральної глибини D (ліворуч) і ширини $FWHM$ (праворуч) трьох ліній заліза різної інтенсивності впродовж 2012–2017 рр.

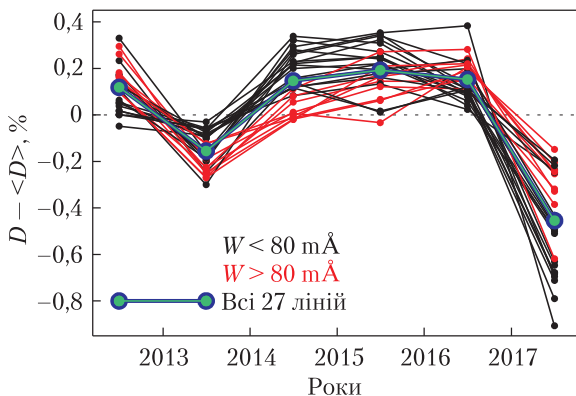


Рис. 9. Варіації центральної глибини D 27 спектральних ліній відносно значень $\langle D \rangle$, усереднених за 6 років. Величини для помірно слабких ліній (еквівалентна ширина $W < 80 \text{ mÅ}$) позначено чорним кольором, а для помірно сильних ліній ($W > 80 \text{ mÅ}$) – червоним. Блакитна лінія з кружками – величини, усереднені по всім 27 лініям

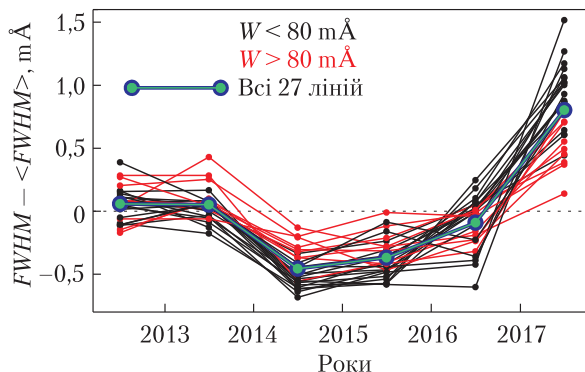


Рис. 10. Варіації ширини $FWHM$ 27 спектральних ліній відносно значень $\langle FWHM \rangle$, усереднених за шість років спостережень. Позначення такі самі, як на рис. 9

нічного і південного полюсів. Висота вхідної щілини спектрографа становить $2'$ дуги, тривалість експозиції – від 1 до 2,5 с. Реєстрація спектра здійснюється в режимі однократного проходження. Починаючи з 2012 р. спостереження проводяться з березня по жовтень щодня, коли дозволяють погодні умови. Загальна кількість днів спостережень за період з 2012 до середини 2017 р. перевищила 300 днів.

Довготривалі варіації параметрів спектральних ліній. Аналіз результатів шестиріч-

ного моніторингу спектральних ліній на телескопі АЦУ-5 свідчить, що найчутливішими індикаторами варіацій фізичного стану атмосфери спокійного Сонця є два параметри:

- центральна глибина $D = [1 - I(\Delta\lambda)/I_C]$ профілю спектральної лінії, де $I(\Delta\lambda)$ – інтенсивність випромінювання лінії на довжині хвилі $\Delta\lambda$ щодо центру лінії, а I_C – інтенсивність неперервного випромінювання поблизу лінії (рис. 6);

- ширина між лівим і правим крилами профілю лінії $FWHM$, там, де інтенсивність випромінювання лінії становить половину від її максимальної величини (так звана Full Width at Half Maximum) (рис. 7).

На рис. 8 показано варіації параметрів D і $FWHM$ з 2012 по 2017 р. для трьох ліній заліза різної інтенсивності, отриманих у результаті спостережень на телескопі АЦУ-5. Найслабша лінія Fe I 538,634 нм ($W = 31,4 \text{ mÅ}$) формується в нижній фотосфері на глибині $H_D = 178 \text{ км}$ [12], де H_D – область формування випромінювання в ядрі лінії, а W – еквівалентна ширина лінії (ширина прямокутника, площа якого дорівнює повній площі спектральної лінії). Область утворення типового представника помірно сильних ліній – лінії Fe I 539,829 нм ($W = 76,6 \text{ mÅ}$) – середня фотосфера ($H_D = 315 \text{ км}$). Згідно з публікаціями [35, 37], сильна лінія Fe I 558,677 нм ($W = 260 \text{ mÅ}$) формується вздовж всієї фотосфери, починаючи від її нижніх шарів (крила лінії) і закінчуючи температурним мінімумом (ядро лінії).

Дані про варіації тих самих параметрів D і $FWHM$, але вже відносно значень, усереднених за шість років спостережень, та для значно більшого числа спектральних ліній наведено на рис. 9 і 10. Загальна кількість цих ліній дорівнює 27. Лінії розбиті на дві групи: порівняно слабкі лінії ($W < 80 \text{ mÅ}$) і порівняно сильні лінії ($W > 80 \text{ mÅ}$). Обидві групи ліній незалежно від висоти їх утворення та належності до того чи іншого хімічного елемента (Ca, Ti, Fe, Ni) і ступеня іонізації (нейтралі або іони) поведуться практично однаково. Для всіх із них характерні невеликі варіації параметрів D і $FWHM$ впродовж 2012–2015 рр. і істотно більші варіації з

наближенням до 2017 р. У 2012, 2014 і 2015 рр. центральна глибина D ліній була в середньому більшою, ніж у 2013 р. Після 2015 р. їх глибина почала швидко зменшуватися (рис. 8, 9). Ширина $FWHM$ ліній після зменшення її протягом часу між 2012 і 2015 рр., навпаки, з наближенням до 2017 р. почала швидко зростати (рис. 8, 10). Слід зазначити, що зміни глибини і ширини відносно середніх значень $\langle D \rangle$ і $\langle FWHM \rangle$ невеликі. Для ширини вони перебувають в інтервалі від $-0,5$ до $+1,5$ мА. Центральні глибини ліній змінюються відносно середніх значень $\langle D \rangle$ в межах від $-0,4\%$ до $+0,8\%$.

Дані за 2012 р. (рис. 8–10) належать до висхідної гілки 24-го сонячного циклу поблизу першого максимуму сонячної активності (рис. 11). Після цього максимуму відбулося незначне зменшення числа плям і загального магнітного поля Сонця. Другий, сильніший максимум спостерігався протягом 2014 і 2015 рр. Після цього почався досить швидкий спад сонячної активності. Порівняно з п'ятьма попередніми роками моніторингу перша половина 2017 р. відзначилася найменшим числом плям і, відповідно, низьким значенням магнітного поля. Отже, параметри ліній у спектрі спокійних ділянок Сонця реагують на модуляцію загального магнітного поля з 11-річним циклом сонячної активності.

Висновки

Метрологічна стабільність горизонтального сонячного телескопа АЦУ-5 ГАО НАНУ на великих часових шкалах (роки) дає можливість вимірювати найменші зміни параметрів сонячних спектральних ліній. Ці зміни перевищують рівень шумів спостережень на цьому телескопі, завдяки чому вдалося виявити і дослідити варіації спокійної атмосфери Сонця, які ще донедавна вважалися малоймовірними. Виявилось, що в 24-му циклі сонячної активності протягом 2012–2017 рр. глибина і ширина ліній у спектрі спокійних ділянок поверхні Сонця корелювали зі зміною глобального магнітного поля Сонця. Спектральні лінії в роки максимуму сонячної активності стають

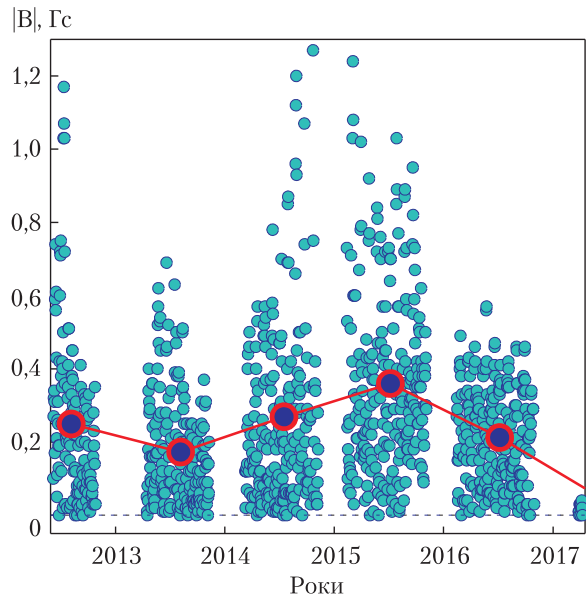


Рис. 11. Варіації модуля загального магнітного поля Сонця протягом 2012–2017 рр. за даними сонячної обсерваторії Wilcox (<http://wso.stanford.edu/meanfld/>). Блакитні кружки — значення поля в дні спостережень на АЦУ-5. Червоні кружки — середні значення поля за спостережний сезон

глибшими і більш вузькими, а в роки мінімуму, навпаки, менш глибокими і більш широкими. Таку поведінку зазначених параметрів можна пояснити змінами температури і поля конвективних швидкостей глибоких шарів спокійної атмосфери Сонця протягом 11-річного циклу. Спокійні ділянки фотосфери Сонця в максимумі сонячної активності стають гарячішими, а в мінімумі — холоднішими.

Ми плануємо продовжити моніторинг спектральних ліній і в наступні роки. Це дасть змогу з'ясувати, як змінюватиметься стан фотосфери Сонця при переході від мінімуму його активності в кінці 24-го циклу до максимуму наступного 25-го циклу. Продовження цих досліджень сприятиме якісному прогнозуванню сонячної активності, що має виняткове значення для всієї біосфери та соціально-економічної системи Землі.

Автор висловлює глибоку подяку співробітникам відділу фізики Сонця Головної астро-

номічної обсерваторії НАН України члену-кореспонденту НАН України, доктору фізико-математичних наук Роману Івановичу Костіку і кандидату фізико-математичних наук Сергію Миколайовичу Осіпову за реалізацію програми моніторингу на телескопі Ернеста Гуртовенка (АЦУ-5). Успішне виконання цієї програми стало можливим завдяки їх високому професіоналізму, науковому ентузіазму і щоденній самовідданій роботі.

Автор дуже вдячний провідному інженеру відділу фізики Сонця Володимиру Григоровичу Безпальку за технічне обслуговування спостережень. Автор висловлює щире вдячність директору Головної астрономічної обсерваторії НАН України, академіку НАН України Ярославу Степановичу Яцківу за всебічну підтримку програми моніторингу спектральних ліній на цьому телескопі.

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Abdussamatov N.I. *The Sun Dictates the Climate of the Earth*. (St. Petersburg: Logos, 2009). [Абдусаматов Х.И. *Солнце диктует климат Земли*. Санкт-Петербург: Logos, 2009].
2. Shapiro A.I., Schmutz W., Rozanov E., Schoell M., Haberleiter M., Shapiro A.V., Nyeki S. A new approach to the long-term reconstruction of the solar irradiance leads to large historical solar forcing. *Astron. Astrophys.* 2011. **529**: A67.
3. Atroshchenko I.N. et al. Variations in the global characteristics of the Sun. (Kyiv: Naukova Dumka, 1991). [Атрощенко И.Н. и др. *Вариации глобальных характеристик Солнца*. К.: Наук. думка, 1991.]
4. Cavallini F., Cepatelli G., Righini A. Long-term width and asymmetry variation of some Fe I photospheric lines in solar quiet regions at the disk center *Astron. Astrophys.* 1986. **158**: 275.
5. Krat V.A., Kokhan E.K. Results of an 11-year program for the study of Fraunhofer line profiles. Motions in the solar atmosphere. *Transactions of the Main Astronomical Observatory at Pulkovo*. 1984. **202**: 49. [Крат В.А., Кохан Е.К. Результаты 11-летней программы исследования профилей фраунгоферовых линий. Движения в солнечной атмосфере. *Известия Главной астрономической обсерватории, Пулково*. 1984. № 202. С. 49–70].
6. Doyle J.G., Jevremović D., Short C.I., Hauschildt P.H., Livingston W., Vince I. Solar Mn I 5432/5395 Å line formation explained. *Astron. Astrophys.* 2001. **369**: L13.
7. Livingston W., Holweger H. Solar luminosity variation. IV. The photospheric lines, 1976–1980. *Astrophys. J.* 1982. **252**: 375.
8. Livingston W., Wallace L., White O.R., Giampapa M.S. Sun-as-a-Star Spectrum Variations 1974–2006. *Astrophys. J.* 2007. **657**: 1137.
9. Livingston W., White O.R., Wallace L., Harvey J. Sun-as-a-Star, Chromospheric Lines, 1974–2009. *Mem. Soc. Astron. Italiana*. 2010. **81**: 643.
10. Keller C.U., Harvey J.W., Giampapa M.S. SOLIS: an innovative suite of synoptic instruments. *Proc. SPIE. Innovative Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*. (eds. S.L. Keil, S.V. Avakyan). 2003. **4853**: 194.
11. <http://solis.nso.edu/0/index.html>
12. Gurtovenko E.A., Kostik R.I. *Fraunhofer Spectrum and the System of Solar Oscillator Strengths*. (Kyiv: Naukova Dumka, 1989). [Гуртовенко Э.А., Костык Р.И. *Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов*. К.: Наук. думка, 1989].
13. Kostik R.I., Shchukina N.G. The Instrumentation of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Advances in Physics of Sunspots*. (eds. B. Schmieder, J.C. del Toro Iniesta, M. Vazquez). ASP Conf. Ser. 1997. **118**: 372.
14. Osipov S.N. Instrumental profile of the spectrograph of the ATU-5 solar telescope of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2015. **31**(5): 261. [Осипов С.Н. Инструментальный контур спектрографа солнечного телескопа АЦУ-5 Главной астрономической обсерватории НАН Украины. *Кинем. физ. небес. тел.* 2015. Т. 31, № 5. С. 72–80.]
15. Gurtovenko E.A., Kostik R.I. On the establishment of internally consistent solar scales of oscillator strengths and abundances of chemical elements. III. Oscillator strengths obtained from equivalent widths of 360 Fe I lines. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1982. **47**: 193.

16. Gurtovenko E.A., Kostik R.I. On the establishment of internally consistent solar scales of oscillator strengths and abundances of chemical elements. I. Oscillator strengths for 865 Fe I lines. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1981. **46**: 239.
17. Burlov-Vasiljev K.A., Matvejev Yu.B., Vasiljeva I.E. New Measurements of the Solar Disk-Center Spectral Intensity in the Near IR from 645 nm to 1070 nm. *Solar Phys.* 1998. **177**: 25.
18. Burlov-Vasiljev K.A., Gurtovenko E.A., Matvejev Yu.B. New absolute measurements of the solar spectrum. *Solar Phys.* 1995. **157**: 51.
19. Lebedev N.I., Oraevsky V.N., Zhugzhda Y.D., Kopaev I.M., Kostyk R.I., Pflug K., Ruediger G., Staude J., Bettac H.D. First results of the CORONAS-DIFOS experiment. Space observations of solar irradiance oscillations. *Astron. Astrophys.* 1995. **296**: L25.
20. Gurtovenko E.A., Kesel'man I.G., Kostyk R.I., Osipov S.N., Lebedev N.I. et al. Photometer "DIFOS" for the study of solar brightness variations. *Solar Phys.* 1994. **152**: 43.
21. Kostik R., Khomenko E. The possible origin of facular brightness in the solar atmosphere. *Astron. Astrophys.* 2016. **589**: A6.
22. Kostik R., Khomenko E., Shchukina N. Solar granulation from photosphere to low chromosphere observed in Ba II 4554 Å line. *Astron. Astrophys.* 2009. **506**: 1405.
23. Khomenko E.V., Kostik R.I., Shchukina N.G. Five-minute oscillations above granules and intergranular lanes. *Astron. Astrophys.* 2001. **369**: 660.
24. Kostyk R.I. Fine Structure of Fraunhofer lines and the structure of the solar atmosphere. *Soviet Astronomy.* 1985. **29**: 65.
[Костык Р.И. Тонкая структура фраунгоферовых линий и строение атмосферы Солнца. *Астрон. журн.* 1985. Т. 62. С. 112–123.]
25. Rutten R.J., Kostik R.I. Empirical NLTE analyses of solar spectral lines. III. Iron lines versus LTE models of the photosphere. *Astron. Astrophys.* 1982. **115**: 104.
26. Kostik R.I. Damping constant and turbulence in the solar atmosphere. *Solar Phys.* 1982. **78**: 39.
27. Gurtovenko E.A. The total photospheric motion field. *Solar Phys.* 1975. **45**: 25.
28. Kondrashova N.N. Spectropolarimetric investigation of the photosphere during a solar microflare. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2013. **431**: 1417.
29. Shchukina N.G., Kondrashova N.N., Khomenko E.V., Kostyk R.I., Chornogor S.N., Alikaeva K.V., Olshevsky V.L., Osipov S.N., Andrienko A.V. Dynamical models of photospheric and chromospheric layers of solar flares for study of flare origin and evolution. *Space Science and Technology.* 2008. **14**(6): 52.
[Шукина Н.Г., Кондрашова Н.Н., Хоменко Е.В. и др. Построение динамических моделей фотосферных и хромосферных слоев вспышек с целью изучения условий их возникновения и развития. *Космічна наука і технологія.* 2008, Т. 14, № 6. С. 52–68].
30. Shchukina N., Trujillo Bueno J. Determining the Magnetization of the Quiet Sun Photosphere from the Hanle Effect and Surface Dynamo Simulations. *Astrophys. J. Lett.* 2011. **731**: L21.
31. Trujillo Bueno J., Shchukina N., Asensio Ramos A. A substantial amount of hidden magnetic energy in the quiet Sun. *Nature.* 2004. **430**(6997): 326.
32. Shchukina N., Sukhorukov A., Trujillo Bueno J. Impact of surface dynamo magnetic fields on the solar abundance of the CNO elements. *Astron. Astrophys.* 2016. **586**: A145.
33. Shchukina N., Sukhorukov A., Trujillo Bueno J. Non-LTE Determination of the Silicon Abundance Using a Three-dimensional Hydrodynamical Model of the Solar Photosphere. *Astrophys. J.* 2012. **755**: 176.
34. Shchukina N.G., Trujillo Bueno J., Asplund M. The Impact of Non-LTE Effects and Granulation Inhomogeneities on the Derived Iron and Oxygen Abundances in Metal-Poor Halo Stars. *Astrophys. J.* 2005. **618**: 939.
35. Shchukina N., Trujillo Bueno J. The Iron Line Formation Problem in Three-dimensional Hydrodynamic Models of Solar-like Photospheres. *Astrophys. J.* 2001. **550**: 970.
36. Israelian G., Rebolo R., García López R. J., Bonifacio P., Molaro P., Basri G., Shchukina N. Oxygen in the Very Early Galaxy. *Astrophys. J.* 2001. **551**: 833.
37. Kostik R.I., Shchukina N.G., Rutten R.J. The solar iron abundance: not the last word. *Astron. Astrophys.* 1996. **305**: 325.
38. Carlsson M., Rutten R.J., Bruls J.H.M.J., Shchukina N.G. The non-LTE formation of Li I lines in cool stars. *Astron. Astrophys.* 1994. **288**: 860.
39. Bruls J.H.M.J., Rutten R.J., Shchukina N.G. The formation of helioseismology lines. I. NLTE effects in alkali spectra. *Astron. Astrophys.* 1992. **265**: 237.

40. Carlsson M., Rutten R.J., Shchukina N.G. The formation of the Mg I emission features near 12 microns. *Astron. Astrophys.* 1992. **253**: 567.
41. Trujillo Bueno J., Shchukina N. Three-dimensional Radiative Transfer Modelling of the Polarization of the Sun's Continuous Spectrum. *Astrophys.J.* 2009. **694**: 1364.

N.G. Shchukina

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

MONITORING OF VARIATIONS OF PHYSICAL PARAMETERS OF THE SUN
WITH 11-YEAR CYCLE OF ACTIVITY

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, May 31, 2017

The observational program of monitoring of long-term variation of solar lines is described. The aim of the program is to study how the physical parameters of the quiet solar atmosphere have changed over the last 11-year solar cycles. The research is based on high spectral resolution observations of the quiet Sun using the horizontal solar telescope ATSU-5 of the Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine. The diagnostics of the solar cycle atmospheric variation is based on observations since 2012 of almost 40 spectral lines of neutral and ionized chemical elements at the solar disk centre and limb near north and south poles. The results of the observations show that the line core depth and full width at half maximum of the many solar spectral lines show response to the cycle modulation of the total unsigned magnetic field of the Sun. The behaviour of these line parameters can be explained by variations of the temperature and convective motions of the quiet photosphere with 11-year cycle of solar activity.

Keywords: Sun, telescopes, instrumentation for observations, spectral lines, solar magnetic field, 11-year cycle of solar activity.