



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 13 • № 2 • 2017 С. 68 – 80

Оглядова стаття

УДК 523.98

Джерела сонячної енергії і міжпланетне магнітне поле

В.Н. Криводубський

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

Проаналізовано джерела енергії сонячної активності. Первинним джерелом сонячної енергії служить ядро Сонця, де в результаті реакцій термоядерного синтезу виділяється енергія у формі γ -квантів і частинок нейтрино, які поширюються назовні. При наближенні до поверхні внаслідок падіння температури і зростання непрозорості речовини повністю іонізована сонячна плазма починаючи з певних глибин переходить в стан часткової іонізації. В результаті цього на відстані близько 0,3 сонячного радіуса від поверхні починає виконуватися критерій Шварцшильда виникнення конвективного перенесення енергії внаслідок гідродинамічних рухів. Вище цієї межі лежить шар конвективної турбулентності, в якому енергія переноситься в основному рухомою речовиною, а не випромінюванням. Його називають конвективною зоною. В кінцевому підсумку частина перенесеної до поверхні променистої енергії надає можливість спостерігати Сонце в різних діапазонах хвиль, тоді як друга частина перенесеної догори енергії, яка зумовлена конвективними рухами, буде проявлятися на фотосферному рівні у вигляді доступних для спостережень грануляційних рухів різних масштабів. Разом з тим частина потоку енергії, що йде із надр Сонця, накопичується і переноситься догори в «магнітній формі». Важливою специфічною властивістю цього високоефективного механізму магнітного перенесення енергії служать його суттєві варіації в часі, що виявляються в циклічних змінах більшості породжуваних магнітними полями явищ, які прийнято називати сонячною активністю. Специфічність цього перенесення енергії проявляється в нестационарній спалаховій конверсії магнітної енергії в тепло, а також в кінетичну енергію прискорених часток і макроскопічних (корональних) викидів плазми. Роль полігона, де зароджуються основні процеси, відповідальні за циклічні прояви сонячної активності, відіграє конвективна зона. У глибинах конвективної зони в результаті механізму динамо деяка частина кінетичної енергії гідродинамічних рухів (диференціального обертання і гіротропної турбулентної конвекції) перетворюється в магнітну енергію в ході сонячного циклу, підсилюючи тим самим слабе магнітне поле Сонця реліктового походження. Згенероване в глибинах глобальне магнітне поле переноситься до сонячної поверхні завдяки його магнітній плавучості. Поверхневі магнітні структури змінюють стан атмосфери Сонця, зумовлюють нерегулярну частину випромінювання і служать джерелом потужних нестационарних явищ в зовнішніх атмосферних шарах (фотосфері, хромосфері і короні). Зроблено огляд сучасної концепції таких явищ, як гаряча сонячна корона, сонячний вітер і міжпланетне магнітне поле, які формують космічну погоду в міжпланетному просторі. Відзначено внесок «київської корональної школи» С.К.Всехсвятського у становлення концепції динамічної корони Сонця.

Ключові слова: Сонце; випромінювання; конвекція; магнітна енергія; космічна погода; корона; сонячний вітер; міжпланетні магнітні поля.

1. ВСТУП

Зараз перед фізикою Сонця стоять дві фундаментальні задачі. Одна з них пов'язана з внутрішньою будовою і енерговиділенням Сонця, а друга — з його магнітною активністю. Оскільки за допомогою телескопа неможливо безпосередньо заглянути всередину Сонця, то наші уявлення про його внутрішню структуру ґрунтуються на теоретичних модельних розрахунках. Всередині Сонця можна виділити три області: ядро, променисту зону і конвективну зону.

Основу діяльності зірок, в тому числі і Сонця, становлять два фізичні процеси: *виділення енергії* в ядрі (де в результаті реакцій термоядерного синтезу утворюються нові хімічні елементи і виділяється 99% сонячної енергії) і *перенесення цієї енергії* від центру назовні. В ядрі при надзвичайно високих температурах ($\approx 15 \cdot 10^6$ К поблизу центру Сонця) плазма знаходиться в повністю іонізованому стані. За таких умов в ядрі в результаті реакцій термоядерного синтезу утворюються нові хімічні елементи і виділяється 99% сонячної енергії. Основна термоядерна реакція — протон-протонний цикл, внаслідок якого з чотирьох протонів утворюється атом гелію. Оскільки атомна маса гелію менша атомної маси чотирьох протонів, то дефіцит маси випромінюється у вигляді високочастотних γ -квантів і частинок нейтрино. За рахунок двох основних механізмів — випромінювання і конвекції — енергія, що виділена при термоядерних реакціях в ядрі у формі γ -квантів, передається назовні. Електромагнітне випромінювання поступово поширюється до поверхні Сонця. Густина сонячної плазми у надрах Сонця настільки велика, що на цьому шляху воно зазнає значних труднощів в поширенні. В результаті дифузії випромінювання відбуваються процеси перевипромінювання: γ -кванти спочатку перетворюються в рентгенівські хвилі, далі ближче до поверхні Сонця послідовно в жорсткий і м'який ультрафіолет, і, нарешті, у хвилі

видимого діапазону, які ми спостерігаємо у вигляді звичного для нас видимого диску Сонця. Шари, де формується неперервний спектр оптичного випромінювання, що доходить до спостерігача, геліофізики називають фотосферою (тобто сферою світла). Відстань від центру Сонця до поверхні, яка становить ~ 700 тис. км (трохи менше двох відстаней від Землі до Місяця), електромагнітне випромінювання долає за час близько одного мільйона років. При наближенні до поверхні Сонця стрімко зростає непрозорість речовини, в результаті чого умови для дифузії випромінювання погіршуються в такій мірі, що сонячна плазма починає перегріватися. Якби не гравітація, то все закінчилося б грандіозним вибухом — скидом перегрітої оболонки Сонця в космос. Але саме завдяки гравітації в дію вступає надзвичайно важливий процес: перемішування перегрітої речовини в глибинах Сонця з більш холодною речовиною ближче до поверхні Сонця (т.зв. *конвекція*). Розглянемо детальніше питання про виникнення конвективної турбулентності на Сонці [1–5].

2. КОНВЕКТИВНЕ ПЕРЕНЕСЕННЯ ЕНЕРГІЇ

Як зазначено вище, енергія Сонця виділяється в його ядрі у вигляді γ -квантів, що утворюються під час термоядерних реакцій. Далі ця енергія переноситься до поверхні за рахунок випромінювання і конвекції. В променистій зоні радіальний потік енергії забезпечується променистим перенесенням: кванти випромінювання поглинаються і послідовно перевипромінюються атомами, передаючи енергію від одного сферичного шару до іншого шару більшого радіусу. Внаслідок цього густина потоку променистої енергії падає, а температура газу зменшується вздовж радіусу Сонця. На певній відстані від центру Сонця температура виявляється вже невеликою в порівнянні з ядром. Звідси випливає два надзвичайно важливі наслідки. Перше, з падінням температури в результаті процесів фотоіонізації в газі з'являється багато вільних електронів, що рухаються досить повільно для того, щоб ядра водню, гелію або важчих хімічних елементів могли захопити їх у зв'язані стани, утворюючи атоми. Друге, при змищенні до поверхні фотони все частіше поглинаються зростаючою кількістю атомів, в результаті чого створюється все більший опір дифузії випромінювання (погіршуються умови перенесення енергії випромінюванням: газ стає менш прозорим для випромінювання), а радіальний (вертикальний) градієнт температури $|dT/dr|_{\text{пром}}$ стає все більш крутим. Надзвичайно важливо, що при наближенні до поверхні температура газу падає в такій мірі, що повністю іонізована плазма починаючи з певних сонячних глибин переходить в стан часткової іонізації.

В найглибших шарах частково іонізованого газу через рекомбінацію вільних електронів з ядрами і іонами з'являються іони більш важких елементів, що сильно поглинають випромінювання. Це призводить до значного збільшення коефіцієнту поглинання κ і тим самим до зростання променистого радіального градієнту температури $|dT/dr|_{\text{пром}}$, величина якого пропорційна коефіцієнту κ . В результаті створюються умови для виникнення конвективної нестійкості. Іншими словами, з падінням температури зростає непрозорість речовини і поступово створюється такий різкий променистий радіальний градієнт температури $|dT/dr|_{\text{пром}}$, що на певній відстані від центру Сонця він перевищить його адіабатичне значення $|dT/dr|_{\text{ад}}$ всередині якогось елементу газу, який повільно зміщується знизу догори без додаткового нагрівання зовні (тобто без теплообміну з навколишнім середовищем). В результаті його рух догори прискорюється і збуджується турбулентна конвекція. Умовою виникнення конвекції служить нерівність

$$\left| \frac{dT}{dr} \right|_{\text{пром}} > \left| \frac{dT}{dr} \right|_{\text{ад}}, \quad (1)$$

що відома під назвою *критерію Шварцшильда*. На Сонці конвективна нестійкість настає на глибині близько 200 тис. км, де температура падає до величини $\approx 2 \cdot 10^6$ К, яка вже недостатня для повної іонізації важких елементів, тому тут розпочинається ділянка їх часткової іонізації. Вище цієї межі лежить шар конвективної турбулентності, в якому енергія переноситься в основному рухомою речовиною, а не випромінюванням. Його називають *конвективною зоною*.

Поблизу зовнішнього шару конвективної зони вступає в дію інший фактор, пов'язаний з ділянками часткової іонізації водню і гелію, який сприяє підсиленню нестійкості. В таких ділянках об'єм газу, що повільно рухається знизу догори і при цьому охолоджується внаслідок розширення, буде водночас нагріватися за рахунок енергії, яка вивільнюється при рекомбінації електронів з ядрами водню і гелію в зонах їх часткової іонізації. Тому температура цього елементу газу буде падати не так швидко, як за відсутності рекомбінації, що призводить до зменшення величини $|dT/dr|_{\text{ад}}$. Внаслідок такого нагрівання, газ що піднімається виявляється більш гарячим і, що ще більш важливо, менш щільним (легшим — внаслідок поперечного балансу тисків), ніж газ навколишнього середовища. В результаті створюються умови для підсилення критерію конвективної нестійкості (1). Такого ж роду нестійкість властива і для елементу газу, що випадково починає рухатися згори донизу. В цьому випадку ключову роль відіграє процес іонізації водню і гелію при стисненні елементу газу, який опускається донизу, що призводить до охолодження газу при його низхідному русі.

Таким чином, конвекція служить переважаючим способом перенесення енергії за умови, коли темпе-

ратура в елементі газу, що піднімається, спадає повільніше, ніж в навколишньому середовищі, внаслідок чого цей конвективний елемент виявляється менш щільним і набуває властивості плавучості. Він переносить своє надлишкове тепло догори і передає частину його навколишньому середовищу за допомогою випромінювання, а розсмоктуючись і руйнуючись — також шляхом безпосереднього перемішування. Після цього охолоджені залишки елемента, ставши щільнішими за навколишнє середовище, опускаються в глибокі і гарячі шари, і весь процес повториться. За виникнення конвективного турбулентного шару несуть відповідальність насамперед рекомбінації вільних електронів з ядрами і іонами важких елементів в глибоких шарах іонізованого газу (що викликає зростання непрозорості середовища і зростання променистого градієнту температури $|dT/dr|_{\text{пром}}$), а також збільшення числа рекомбінацій в ділянках часткової іонізації водню і гелію (які приводять до пониження адіабатичного градієнту температури $|dT/dr|_{\text{ад}}$).

3. РОЛЬ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В ПЕРЕНЕСЕННІ ЕНЕРГІЇ

Однак в сонячних надрах поряд з цими двома основними механізмами перенесення енергії існує ще один фактор, який бере активну участь в процесах перенесення енергії. Цим фактором служить магнітне поле. Частина потоку енергії, що йде із надр Сонця, накопичується і переноситься назовні в «магнітній формі». Саме параметрами магнітного поля, величиною його індукції, просторовою структурою і часовою еволюцією зумовлюються як існування, так і основні властивості сонячних активних утворень. На Сонці змінне магнітне поле служить одним із специфічних високоефективних механізмів перенесення енергії, який виглядає своєрідним нелінійним відгуком Сонця на потік енергії, що проходить через його шари [3]. Специфічність цього перенесення енергії проявляється в нагріванні до високих температур верхніх шарів сонячної атмосфери (за рахунок електричних струмів і магнітогідродинамічних хвиль), а також в нестаціонарній спалаховій конверсії магнітної енергії в тепло, в кінетичну енергію прискорених часток і макроскопічних викидів плазми (т.зв. *корональних викидів маси* — КВМ). В сильно розріджених верхніх шарах сонячної атмосфери магнітна енергія вивільнюється, зумовлюючи тим самим спостережену інверсію температури в хромосфері і короні. Другою специфічною властивістю магнітного перенесення енергії служать його суттєві варіації в часі, які виявляються в циклічних змінах більшості явищ, породжуваних магнітними полями. Середній період магнітних циклічних змін становить 22 роки (цикл Хейла) і складається з двох 11-річних циклів Швабе–Вольфа [6]. На Сонці весь комплекс магнітних явищ, що містить в собі плямоутворюючу, спалахову, хвильову та інші форми (факели, протуберанці, корональні викиди маси) проявів нестаціонарних процесів, прийнято називати *сонячною активністю* (СА). Згідно сучасних поглядів, які сформувалися на основі спостережень та теоретичних уявлень, практично всі теорії циклічних магнітних змін базуються на концепції збудження глобального магнетизму в результаті механізму турбулентного динамо [7–14]. Роль турбулентної «динамо-машини» на Сонці відіграє його конвективна зона, де поле гідродинамічних швидкостей речовини природно поділене на два істотно відмінних масштаби: крупномасштабну (глобальну) швидкість, що відповідає сонячному диференційному обертанню, і дрібномасштабну гіротропну турбулентну конвекцію. Відповідно до гідродинамічного механізму динамо частина енергії обертання і енергії турбулізованих конвективних рухів в ході сонячного циклу переходить в енергію магнітного поля, яка за рахунок магнітної плавучості переноситься до поверхні Сонця і вивільнюється в атмосферних шарах внаслідок нестаціонарних процесів. Запасена магнітна енергія сконцентрована в плазмових корональних структурах у вигляді протуберанців (їхніх петель і аркад), «сигмоїдах» та інших конфігураціях складної топології. Надлишок накопиченої магнітної енергії скидається у міжпланетний простір у процесах сонячних спалахів і корональних викидів маси.

4. КОРПУСКУЛЯРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ СОНЦЯ І КОСМІЧНА ПОГОДА

В другій половині ХХ століття в період активного вивчення і освоєння космосу сформувався новий науковий напрям досліджень залежностей між геліофізичними і геофізичними процесами, що дістав назву «сонячно-земні зв'язки». Суть нового наукового напрямку полягає у вивченні впливу СА через міжпланетне середовище на навколоземний простір (магнітосферу, іоносферу і атмосферу Землі) і реакції захисних оболонок Землі на цей вплив. Зокрема, великої актуальності набуває вивчення впливу СА на біосферу (живий і неживий світ). На сучасному етапі розвитку науки цей напрям набув назву «космічна погода» (КП) [15–19]. Довгоперіодичні (10, 100 і більше років) тенденції космічної погоди називають космічним кліматом.

Основоположник геліобіології Чижевський О.Л. [20] в своїх публікаціях на початку ХХ ст. вперше науково обґрунтував гіпотезу про зв'язок багатьох сонячних і земних процесів, зумовлених зовнішніми джерелами енергії, випромінювання та потоків речовини, і вперше використав словосполучення «космічна погода». Зміни КП істотно впливають на клімат і метеорологічну погоду, наземні і космічні технології, самопочуття і стан здоров'я людей і, мабуть, на соціальні процеси. Тому дослідження фізичної природи СА, вияснення механізмів її циклічності, встановлення взаємозв'язків процесів глобальної

діяльності Сонця і їх впливу на КП становлять фундаментальну проблему сонячної фізики. У практичному сенсі актуальними є питання прогнозу сонячної і геомагнітної активності, дослідження впливу сонячних факторів на технічні системи (радіоперешкоди, радіаційна обстановка та ін.), впливу на біологічні системи і людей, а також питання захисту від згубного впливу несприятливих факторів космічного походження.

Первинним джерелом змінності КП служать, головним чином, електромагнітне і корпускулярне випромінювання, для яких характерні циклічні варіації з часом. Основна частка змінного електромагнітного випромінювання припадає на короткохвильовий діапазон — ультрафіолет і рентген. Корпускулярне випромінювання Сонця складається головним чином із електронів і протонів. Його можна розділити на два великих динамічних класи в залежності від енергії окремих часток: сонячні космічні промені і сонячний вітер (детальніше див. нижче).

Зауважимо, що слід розрізняти терміни «радіація» та «іrrадіація». У найширшому сенсі слова, *радіація* (лат. «сйаво», «випромінювання») — це процес поширення енергії в просторі у формі різних хвиль і частинок. Разом з тим, інтенсивність сонячного випромінювання, яка досягає Землі змінюється в залежності від часу доби, року, місця розташування і погодних умов. Загальна кількість енергії, підрахована за певний проміжок часу, називається *іrrадіацією* (іншими словами, «прихід сонячної радіації» або «доза сонячної радіації») і показує, наскільки потужним було сонячне випромінювання. Варто також розуміти різницю між такими термінами, як «радіація» і «радіоактивність». Якщо перше можна застосувати до іонізуючого випромінювання, що знаходиться у вільному просторі і яке буде існувати, поки не буде поглинуте будь-яким предметом (речовиною), то радіоактивність — це здатність речовин і предметів випускати іонізуюче випромінювання, тобто бути джерелом радіації.

5. ГАРЯЧА КОРОНА СОНЦЯ

Вище хромосфери розпочинається суто зовнішня і найбільш розріджена частина атмосфери Сонця, в якій температура зростає в 100 разів і яку називають *сонячною короною* (СК) [21]. Неозброєним оком корону можна спостерігати лише в рідкісні моменти часу повних сонячних затемнень у вигляді променистого ореолу попелястого кольору, що оточує закритий Місяцем сонячний диск. У 1930-х роках вчені визначили, що температура сонячної корони повинна сягати мільйона градусів, оскільки корона залишається досить яскравою при великій відстані від Сонця, що добре видно під час повних сонячних затемнень. Пізніше спектроскопічні спостереження (в результаті яких кілька емісійних ліній оптичного спектру корони були ототожнені з лініями високоіонізованих атомів Fe, Ni і Ca, позбавлених від 9 до 14 електронів) підтвердили висновок, що важливою особливістю СК служить її надзвичайно висока температура $((1 \div 2) \cdot 10^6 \text{ K})$. Тому корональна плазма повністю іонізована. Сучасні оцінки температури за градієнтом густини і профілями спектральних ліній показують, що іонна температура вище хромосфери підвищується до двох мільйонів градусів Кельвіна на відстані $\sim 70\,000$ км від видимої поверхні Сонця, а потім починає спадати, досягаючи біля Землі ста тисяч кельвінів. Проблема нагріву сонячної корони залишається невирішеною. Існує кілька припущень щодо незвично високої температури в короні в порівнянні з хромосферою і фотосферою. Загальновідомо, що енергія в корону приходить з нижчих шарів, які включають фотосферу і хромосферу. Тому найбільшого поширення серед дослідників набули припущення, що в нагріванні корони можуть брати участь насамперед такі процеси: магнітозвукові і альфвенівські хвилі, магнітне перез'єднання та мікроспалахи в короні.

Сонячна корона відстежується до десятків радіусів Сонця і поступово розсіюється в міжпланетний простір у вигляді сонячного вітру. Загальний вигляд СК змінюється з ходом 11-річного циклу сонячної активності. В епоху максимуму активності вона порівняно округла, тоді як в епоху мінімуму стає витягнутою вздовж екваторіальної площини. Як згадувалося, корональна плазма повністю іонізована. Густина електронів в короні визначають по розсіянню короною видимого світла. Середня концентрація електронів в нижній частині спокійної внутрішньої корони (яка простягається на відстані $\sim 0,2 - 0,3$ радіуса Сонця) становить $\sim 10^8 \text{ см}^{-3}$. Оскільки гаряча корона представляє собою добре електропровідну плазму, то спостережена в ній волокниста структура ніби відслідковує в замороженій в плазму магнітні силові лінії і тим самим «показує» астрономам структуру глобального магнітного поля Сонця. Внаслідок надзвичайної розрідженості коронального газу навіть слабкі магнітні поля ($\sim 1 - 10 \text{ Гс}$), які проникають із фотосфери, визначають променеву структуру СК і контролюють динаміку плазми в ній. Структура корони пов'язана з конфігураціями активних ділянок Сонця — з плямами і протуберанцями, а її промені тягнуться вздовж магнітних силових ліній, що виходять з активних ділянок. Характерним елементом крупномасштабної структури СК є корональні промені (*стримери*) з підвищеною (майже на порядок величини в порівнянні з концентрацією довколишньої корони) концентрацією плазми. Корональні промені утворюються в результаті взаємодії плазми, що витікає з хромосфери, з магнітним полем. В нижній частині корони (до висот одного радіуса Сонця) в ділянках із замкнутими силовими лініями магнітне поле перешкоджає витоку плазми в міжпланетний простір. В міру віддалення від Сонця стример стискується у вузький корональний промінь. Тут магнітне поле слабшає і витягується повільним сонячним вітром

в радіальному напрямі. Разом з тим, близько 20% сонячної поверхні вкривають ділянки уніполярного магнітного поля (відкритих силових ліній, що мають приблизно радіальний напрям), які характеризуються значно пониженою (приблизно в три рази в порівнянні з спокійним Сонцем) концентрацією часток і помітно меншою температурою (всього мільйон градусів, тоді як над спокійними ділянками вона наближається до двох мільйонів градусів). Тому такі ділянки виглядають темними утвореннями на рентгенівських і ультрафіолетових зображеннях корони. З цієї причини дослідники назвали їх *корональними дірами*. Ці досить стійкі структури зберігають свою конфігурацію впродовж кількох обертів Сонця. На фазі мінімуму сонячного циклу корональні діри локалізуються над полярними шапками Сонця, а на фазі максимуму — на низьких широтах. Актуально, що в фотосфері і нижній хромосфері діри (потемніння) проявляються мало, а найчастіше зовсім не проявляються. Ні грануляція або супергрануляція, очевидно, ніяк з ними не пов'язані. Приплив механічної енергії, що йде через фотосферу вгору (акустичні і МГД-хвилі), ймовірно, один і той же всередині і зовні дір. На що ж тоді витрачається надлишок енергії? Адже температура і густина в корональних дірах менші, ніж в довколишніх ділянках, а це означає, що в них менше втрати на випромінювання (саме тому діри і виглядають темними). На підставі новітніх даних вдалося прояснити ситуацію: надлишок енергії йде на створення і прискорення швидкого сонячного вітру, який витікає із корональних дір.

Ще однією поширеною структурою сонячної атмосфери є *протуберанці* — «хмари» холодної (з температурою $T \sim 10^4$ К, що на два порядки менше температури довколишньої корони) і щільної (з густиною $n \sim 10^{10} - 10^{11}$ см⁻³, що на два-три порядки більше густини корони) хромосферної плазми, завдовжки 150–300 тис. км. Ці утворення винесені вибуховим процесом у СК на висоти кількох сотень тисяч кілометрів і утримуються там магнітним полем величиною $\sim 4 - 20$ Гс. Через протуберанці постійно здійснюється обмін речовиною між відносно холодною хромосферою і гарячою короною. Одним із можливих механізмів наповнення протуберанців речовиною може служити сифонний процес, коли за рахунок градієнту тисків речовина всмоктується в корону із хромосфери. Маса великого протуберанця порівняна з масою всієї корони. На хромосферному рівні протуберанці спостерігаються у монохроматичному випромінюванні (наприклад, у спектральних лініях водню H_α) у вигляді темних волокон, тоді як на лімбі сонячного диску — у вигляді яскравої виступаючої аркади петель. Кінці волокон кріпляться на поверхні фотосфери в ділянках з протилежною магнітною полярністю. Протуберанці — довготривалі утворення, які можуть існувати впродовж тижнів і навіть місяців. Водночас процес їхнього зникнення носить швидкий — всього десятки хвилин, вибухоподібний характер, ймовірно, пов'язаний з анігіляцією магнітного поля (перез'єднанням протилежно спрямованих магнітних силових ліній). Він може супроводжуватися раптовими активними рухами в протуберанцях, ерупцією, спалахом в хромосфері або викидом речовини у корону. Явище спорадичного виверження крупномасштабних плазмових структур у вигляді радіального імпульсу, що з великою швидкістю (до 2000 км/с) поширюється в міжпланетному просторі, отримало назву «*корональний викид маси*» (Coronal Mass Ejection — CME). Раніше його називали «корональним транзієнтом». Корональні викиди маси (КВМ) часто спостерігаються у сонячному вітрі у вигляді «магнітних хмар» — згустків плазми з вимороженим в неї магнітним полем. Через високу температуру СК основне її випромінювання лежить в рентгенівській частині сонячного спектру, недоступній для спостережень із Землі. Тому основні способи отримання нових даних про СК на сучасному етапі здійснюються з допомогою рентгенівської оптики позаатмосферних орбітальних коронографів, встановлених на космічних апаратах.

6. СОНЯЧНИЙ ВІТЕР

Внаслідок високої температури і радіального температурного градієнту плазма сонячної корони не може утримуватися гравітаційним полем в термодинамічній і механічній рівновазі і тому через її перегрівання поступово витікає з атмосфери зірки в міжпланетний простір. Припущення про існування постійного потоку частинок, що летять від Сонця, вперше в 1859 р. було висловлено британським астрономом Річардом Керрінгтоном. В 1916 р. норвезький дослідник Крістіан Біркеланд одним з перших передбачив існування сонячного корпускулярного випромінювання, що складається з негативних і позитивних іонів. Майже водночас (в 1917 р.) Штьормер С. висловив припущення [22], що полярні сйва викликаються зарядженими частинками, які випускаються точковим джерелом на Сонці і відхиляються в полярних ділянках дипольним магнітним полем Землі. Витікання сонячної плазми (однаке, тільки під час сонячних спалахів) було завбачено Чепменом С. і Ферраром В. в 1931 р. для пояснення природи магнітних бур [23]. В середині 1950-х років Чепмен С. показав, що сонячний газ при високих температурах стає прекрасним провідником тепла і розсіює його в міжпланетний простір за межі орбіти Землі (статична модель гарячої корони) [24]. Недоліком чепменівської моделі було те, що статичні розв'язки рівнянь гідродинаміки для гарячої корони приводили до невиправдано високих значень тиску і густини плазми на великих відстанях від Сонця. В той же час дослідник комет Бірман Л. висунув припущення, що спостережене зростання прискорення молекулярних іонів в яскравих кометних хвостах в періоди підвищення сонячної активності для свого пояснення вимагає спрямованих від Сонця неперервних потоків

частинок, які зростають в епохи високої активності [25, 26]. Він зазначив, що іонізацію і збудження молекулярних іонів в кометних хвостах також можна пояснити тільки впливом якогось потоку частинок.

Американський астрофізик Паркер Е. в 1958 р. [27] вирішив критично проаналізувати гіпотезу Чепмена про гарячу і протяжну статистичну корону [24] і водночас дослідити грубі динамічні припущення Бірмана про роль неперервних потоків частинок в прискоренні молекулярних іонів в кометних хвостах [25, 26]. Він показав, що навіть незважаючи на те, що сонячна корона сильно притягається Сонцем, вона настільки добре проводить тепло, що залишається гарячою на великій відстані. Оскільки з відстанню від Сонця його тяжіння слабшає, з верхньої корони починається неперервне надзвукове витікання речовини в міжпланетний простір. Паркер зробив висновок, що гаряча течія від Сонця в чепменівській моделі статичної корони і неперервний потік частинок в гіпотезі Бірмана, який прискорює кометні хвости і збуджує в них молекулярні іони, — це два прояви одного і того ж явища, яке він назвав «сонячним вітром» [27, 28]. Він писав: «Сонячний вітер водню неперервно дує в сонячній системі. Виникаючи на Сонці, він проноситься повз Землю зі швидкістю 400 км/с, досягає віддалених планет і йде в міжзоряний простір. Подібно до мітли, він вимітає гази, що витікають із планет і комет, дрібні частинки метеороного пилу і навіть космічні промені. Він відповідальний за зовнішні області радіаційних поясів на Землі, за геомагнітні бурі і полярні сяйва, за різноманітні динамічні процеси в міжпланетному просторі».

Для ізотермічного сферично-симетричного потоку плазми, що знаходиться під дією градієнту газового тиску і гравітації, Паркер отримав доволі просте рівняння для швидкості витікання плазми u

$$\left(u - \frac{u_c^2}{u}\right) \frac{du}{dt} = \frac{2u_c^2}{r} - \frac{GM_\odot}{r^2}, \quad (2)$$

де u_c — ізотермічна швидкість звуку, G — гравітаційна стала, M_\odot — маса Сонця. Рівняння має критичну точку при $u = u_c$, через яку обов'язково повинен пройти його розв'язок для того, щоб потік на великій відстані r став надзвуковим. Початкова швидкість не може бути довільною, а повинна бути визначеною (~ 10 км/с). При температурі 10^6 К рівняння (2) дає на відстані 1 а.о. швидкість u близько 300 км/с. Теорія Паркера була піддана жорсткій критиці. Його стаття, надіслана в 1958 р. в *Astrophysical Journal*, була забракована двома рецензентами і тільки завдяки редактору Субраманьяну Чандрасекару потрапила на сторінки журналу [27].

До Паркера корпускулярне випромінювання Сонця дослідники розділяли на два великі динамічні класи в залежності від енергії окремих часток. Під час сонячних спалахів і корональних викидів маси часто виділяються високоенергійні протони, які зазвичай називаються *сонячними космічними променями* (СКП) із-за їхньої великої схожості з істинними космічними променями галактичного походження. СКП характеризуються енергіями вище 10^7 еВ/нуклон. Характерний час життя коротких (імпульсних) подій СКП, пов'язаних із спалахами, становить кількох годин, тоді як тривалі (поступові) події СКП, що слідує за КВМ, можуть тривати кілька діб [29]. Поступові події СКП більш потужні, в окремих випадках енергія часток може досягати $2 \cdot 10^{10}$ еВ. Крім цієї спорадичної компоненти космічних променів, в корпускулярне випромінювання Сонця входить також неперервне випускання протонів (з рівною кількістю електронів для підтримки нейтральності потоку в цілому) в області енергій порядку 10^3 еВ. Це випромінювання зазвичай називали просто сонячною корпускулярною радіацією. Таку назву Паркер вважав невдалим, оскільки це випромінювання при величезних масштабах міжпланетного простору можна розглядати як неперервне витікання рідини або газу, зумовлене гідродинамічним надзвуковим розширенням сонячної корони. Саме тому він запровадив термін «сонячний вітер» як більш наочний [27, 28].

Ідея Паркера, яка зародилася із гіпотези Чепмена про корону, як дуже гаряче і протяжне, але статичне утворення, революційно відкинула уявлення про статичність. Таким чином, за влучним виразом Паркера, явище неперервного надзвукового розширення корони дістало назву сонячного вітру, хоча впритул до розуміння природи сонячної корони трьома роками раніше (в 1955 р.) підійшли вчені Київського університету (Всехсвятський С.К., Никольский Г.М., Пономарьов Є.О. і Чередниченко В.І.), які побудували першу кінематичну і гідродинамічну модель корони [30]. Київські астрофізики показали, що протяжна корона втрачає енергію на випромінювання і може перебувати в стані гідродинамічної рівноваги тільки при спеціальному розподілі потужних внутрішніх джерел енергії. У всіх інших випадках повинен існувати потік речовини та енергії назовні. Цей процес служить фізичним підставою для важливого явища, яке київські вчені назвали «динамічною короною». Результати сміливої концепції узагальнив Пономарьов Є.О. (аспірант Всехсвятського С.К.) в своїй кандидатській дисертації [31], обґрунтувавши теоретичну модель «гідродинамічної корони» [30]. На жаль, в «динамічну корону» радянські «наукові метри» не повірили і не сприяли її поширенню серед зарубіжних вчених. В результаті всі лаври першовідкривача корони, що гідродинамічно розширюється, дісталися американському вченому Паркеру Ю.

Через адіабатичне розширення гарячої плазми потік СВ прискорюється під час руху. Спочатку швид-

кість розширення дуже мала у внутрішній короні, але швидко зростає з висотою. На відстані критичного радіусу r_c теплова енергія стає порівняною з кінетичною енергією газу, що розширюється. В цій критичній точці швидкість розширення u наближається до швидкості звуку в плазмі u_c (її іноді називають звуковою точкою). На більших відстанях швидкість розширення зростає ще більше і СВ стає надзвуковим, а потім на деякій відстані усталюється.

В 1959 р. перші прямі вимірювання властивостей сонячного вітру були проведені радянськими космічними станціями «Луна-1» і «Луна-2». Три роки по тому такі ж вимірювання були проведені американською станцією «Марінер-2». Згідно з вимірюваннями з космічних апаратів, неперервний потік плазми СВ складається в основному з протонів та електронів з невеликими домішками ядер гелію (альфа-частинок) і важких елементів. СВ витісняє міжзоряну плазму із області з радіусом ~ 100 а.о., формуючи таким чином *геліосферу* [29]. Далі перенесена сонячним вітром кількість руху стає порівняною з тою, яку несуть потоки газу, що йдуть від інших зірок. Тут СВ перемішується із зоряними вітрами.

В результаті подальших вимірювань за допомогою космічних апаратів було встановлено, що СВ має бімодальний характер: це суміш повільного (спокійного) і швидкого потоків плазми [29, 32, 34]. Швидкий потік, в свою чергу, ділиться на квазістаціонарні і спорадичні потоки, що мають різну природу. Швидкість потоку СВ залежить від конфігурації магнітного поля і процесів у ділянці корони, звідки він спрямований. Спокійний (повільний) СВ — постійний потік сонячної плазми, що утворюється над ділянками закритого магнітного поля, силові лінії якого обома кінцями закріплені в фотосфері. Швидкість спокійного СВ u (на орбіті Землі) становить $\sim 300 - 500$ км/с (що відповідає енергії $\sim 400 - 500$ еВ/протон), концентрація часток n становить $\sim 10 - 15$ см $^{-3}$ (це відповідає потоку часток $\sim 5 \cdot 10^8$ протон/см 2 ·с при густині енергії біля 10^{-8} ерг/см 3). Тиск СВ обчислюється за формулою $P = 1,6726 \cdot 10^6 n u^2$, де P — тиск в наноПаскалях. Швидкий СВ виникає в тій частині корони, де силові лінії магнітного поля з поверхні Сонця йдуть в міжпланетний простір («відкрите» магнітне поле). Квазістаціонарні високошвидкісні потоки сонячної плазми, відповідальні за рекурентні геомагнітні збурення, спостерігаються над корональними дірами. Швидкість тут підвищена до $700 - 1000$ км/с, а концентрація часток знижена до $3 - 4$ см $^{-3}$. У мінімумі сонячної активності повільний і швидкий потоки сонячного вітру просторово розділені: стримери і спокійний потік СВ спостерігаються ближче до площини екватора, тоді як корональні діри зміщені до полюсів, вище 70° . Там, де швидкісний потік наздоганяє повільний, утворюється ударна хвиля, в якій концентрація частинок і напруженість магнітного поля вище, ніж в решті частини потоку. Спорадичні високошвидкісні потоки — відносно короткочасні і складні за структурою утворення, відповідальні за спорадичні магнітосферні збурення, зокрема, з ними пов'язані великі магнітні бурі. Швидкість СВ в спорадичних потоках сягає 1200 км/с. Тривалий час вважалося, що спорадичні потоки в СВ зумовлені сонячними спалахами. Сьогодні їхнім джерелом частіше називають КВМ, хоча роль сонячних спалахів повністю відкидати немає підстав.

Завдяки потокам СВ Сонце безперервно втрачає частину своєї маси. Витіканню плазми із внутрішніх шарів корони в значній мірі перешкоджають замкнені силові лінії магнітних структур в сонячній атмосфері, що охоплюють великий об'єм корональної плазми. На додаток до неперервного коронального розширення часто спостерігаються нестационарні викиди речовини в корону. Як вже згадувалося, час від часу конфігурації сильного замкненого (стримувального) магнітного поля раптово анігілюють, що супроводжується крупномасштабними локалізованими викидами речовини із нижніх шарів сонячної корони в міжпланетний простір (КВМ). Тобто у такий спосіб відбувається перетворення магнітної енергії в кінетичну енергію рухомої плазми.

Параметри СВ вимірюються на космічних апаратах уже більше ніж 50 років, що становить більше чотирьох сонячних циклів. Проведені вимірювання показали, що динамічний тиск СВ змінюється приблизно у два рази при переході від максимуму сонячної активності до її мінімуму [35]. Зображення корони в білому світлі, отримані під час наземних спостережень повних сонячних затемнень, не можуть дати відповідь на питання, чи статична видима корона, чи це динамічне стаціонарне утворення. Тільки коронографи LASCO/SOHO (встановлені на космічних апаратах), що мають високі просторові і часові розділення, надали можливість безпосередньо спостерігати неперервне витікання сонячної плазми в міжпланетний простір [36].

Зауважимо, що не слід плутати поняття «сонячний вітер» (потік іонізованих частинок, що долітає від Сонця до Землі за 2–3 доби) і «сонячне світло» (потік фотонів, який долітає від Сонця до Землі в середньому за 499 секунд). Зокрема, саме ефект тиску сонячного світла (а не сонячного вітру) використовується в проектах т.зв. сонячних вітрил, тоді ж як двигун для космічного апарату, який використовує в якості джерела тяги імпульс іонів сонячного вітру, називають електричним вітрилом.

7. МІЖПЛАНЕТНЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ

Внаслідок високої електропровідності сонячної плазми магнітне поле Сонця виявляється в замороженім у корональні потоки. Тому при розширенні корони магнітне поле \vec{B} і швидкість сонячного вітру \vec{u}

пов'язані одне з одним гідродинамічним рівнянням

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{rot}(\vec{u} \times \vec{B}). \quad (3)$$

Однак, «хто кого тягне», що визначає динаміку і структуру: плазма чи магнітне поле — це залежить від співвідношення теплової і кінетичної енергій рухомої плазми (динамічного тиску плазми) і енергії магнітного поля (магнітного тиску). В різних ділянках сонячної атмосфери здійснюються обидва ці випадки. На рівні фотосфери і вище, де велика густина кінетичної енергії рухів, структура магнітного поля, корені якого пов'язані з активними областями, і її зміни зумовлені рухами плазми. Тут магнітна конфігурація визначається суперпозицією радіальної і тангенціальної складових поля. Над фотосферою концентрація плазми швидко падає, тоді як величина магнітного поля зменшується значно повільніше, через що до відстаней близько трьох радіусів Сонця магнітний тиск домінує над динамічним тиском рухомої плазми. Тому в цій перехідній ділянці магнітне поле поступово набуває радіального спрямування (тангенціальна складова вноситься потоком плазми) і тим самим забезпечує радіальне спрямування руху плазми від Сонця. Саме тут нерозривний зв'язок між корональними магнітними полями і плазмою примушує корону обертатися з такою ж самою кутовою швидкістю, що й фотосфера, подібно до твердого тіла. Ділянка (поверхня) на відстані до $R_s \sim 2-3$ радіусів Сонця, де магнітне поле набуває радіального спрямування і контролює рух плазми, дослідники називають поверхнею джерела СВ. Однак далі від Сонця величина магнітного поля стрімко спадає, в результаті чого починаючи з певної відстані (більше 3 радіусів Сонця) динамічний тиск СВ на два порядки перевищує магнітний тиск. Завдяки цьому газодинамічні процеси в плазмі знову визначають структуру магнітного поля. Магнітні силові лінії починають відставати від свого джерела, оскільки їх захоплює за собою рухома плазма, яка намагається зберегти момент кількості руху, а не кутову швидкість. Суттєво, що при віддаленні від Сонця плазма СВ, розширюючись радіально, водночас обертається разом із Сонцем. Азимутальна швидкість СВ на орбіті Землі становить $\sim 3-5$ км/с. В результаті додавання радіального і азимутального рухів лінії потоків СВ закручуються в площині екліптики в спіралі Архімеда. В умовах вимороженості під впливом динамічного тиску плазми магнітне поле в міжпланетному середовищі в екваторіальній площині Сонця також набуває в загальних рисах вигляду архімедових спіралей, закручених проти напрямку обертання Сонця (рис. 1,а). Таке глобальне магнітне поле, яке виникає в результаті витягування силових ліній загального магнітного поля Сонця в міжпланетний простір при розширенні корони, прийнято називати *міжпланетним магнітним полем* (ММП) [28, 32, 33]. Із рис.1,а видно, що спокійне ММП всередині земної орбіти має переважно радіальне спрямування, хоча його силові лінії приходять до Землі із напрямку, трохи зсунутого до заходу відносно напрямку на Сонце. Кут нахилу спіралі в точці перетину з орбітою Землі відносно радіального напрямку становить $\sim 45-55^\circ$ (рис. 2). За межами орбіти Землі спіральний характер поля внаслідок обертання Сонця підсилюється, так що ММП набуває переважно азимутального спрямування.

Вимірювання параметрів ММП за допомогою штучних супутників Землі поблизу екваторіальної площини Сонця виявили його крупномасштабну впорядкованість. Середня величина ММП на орбіті Землі становить приблизно $5 \cdot 10^{-5}$ Гс і залежить від фази сонячного циклу. Спостережена крупномасштабна структура ММП розділена на 2, 4 або більше парне число секторів (в залежності від степені хвилястості геліосферного струмового шару) з різним спрямуванням (переважно від Сонця чи до Сонця) магнітного поля вздовж архімедової спіралі — т.зв. *секторна структура ММП* (рис. 1,б, 3).

Магнітні сектори заповнені швидкими потоками СВ, тоді як межі секторів зазвичай розміщені всередині повільних потоків СВ. Магнітна секторна структура обертається разом з Сонцем і може спостерігатися впродовж кількох обертів Сонця. Секторна межа (границя), що розділяє поля протилежних спрямувань (знаків), зазвичай дуже тонка і проноситься мимо спостерігача (внаслідок обертання межі) за час порядку кількох хвилин, тоді як час, який відповідає ширині типового сектору, становить приблизно тиждень.

Зауважимо, що рис. 1 і 3 дають лише схематичне зображення ММП у вигляді проекції на екваторіальну площину. В дійсності ММП об'ємне (рис. 4,а) і має вельми специфічну просторову структуру в сферичних координатах (спіраль Паркера) [27]:

$$B_r(r, \theta, \varphi) = B_0(\theta, \varphi) \left(\frac{R_s}{r} \right)^2, \quad (4)$$

$$B_\theta(r, \theta, \varphi) = 0, \quad (5)$$

$$B_\varphi(r, \theta, \varphi) = B_0(\theta, \varphi)(r - R_s) \left(\frac{\Omega}{u_p} \right) \left(\frac{R_s}{r} \right)^2 \sin \theta, \quad (6)$$

де $B_0(\theta, \varphi)$ — поле на поверхні сфери радіуса R_s (поверхні джерела), за якою потік тече радіально з постійною швидкістю u_p ; Ω — кутова швидкість Сонця. Припускалось, що поле $B_0(\theta, \varphi)$ на поверх-

ні радіусу R_s носить дипольний характер. Із рис. 4,а видно, що закручене магнітне поле змінює напрям своєї спіральності при переході сонячного екватора і набуває складну форму хвильових спіральних складок, які нагадують викривлені поля широкополого капелюха («модель сомбреро»). Причину формування ММП такої складної конфігурації дослідники часом називають «ефектом садового шлангу». Саме таку форму набувають струмені води, якщо зміщувати садовий шланг догори-донизу і водночас повертати його навколо осі. У випадку Сонця роль такого струменя відіграє СВ.

Джерелом секторної структури ММП служать уніполярні сонячні магнітні поля, що зазвичай мають протилежні спрямування в північній і південній півсферах. Силкові лінії ММП на поверхні вище площини магнітного екватора спрямовані в одному напрямі, наприклад, від Сонця в певному циклі сонячної активності, тоді як нижче екватора вони будуть спрямовані до Сонця. Цей шар представляє собою поверхню в межах Сонячної системи і розділяє області, в яких плазма СВ рухається з двох різних півсфер Сонця з протилежними напрямками уніполярних магнітних полів. Дві плазмові області на Сонці (північна і південна) розділені широким екваторіальним магнітним нейтральним шаром, звідки СВ

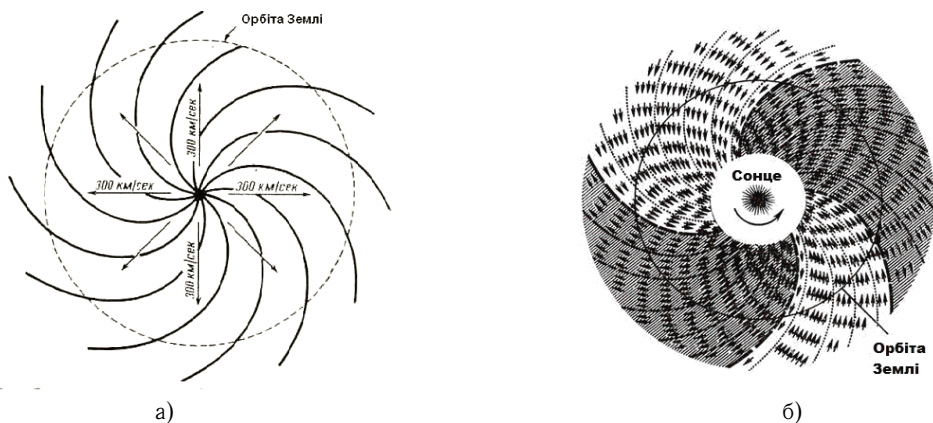


Рис. 1. Ідеалізована конфігурація спокійного міжпланетного магнітного поля (в екваторіальній площині Сонця), що виникає в результаті витягування загального магнітного поля сонячним вітром (з радіальною швидкістю 300 км/с) з урахуванням обертання Сонця (а); ідеалізована секторна структура ММП (б).

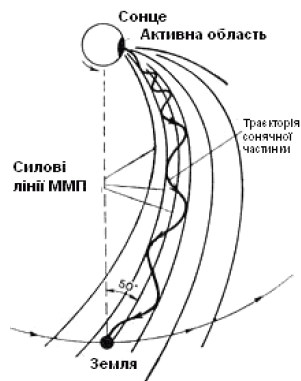


Рис. 2. Сонце, сонячний вітер, міжпланетне магнітне поле і Земля

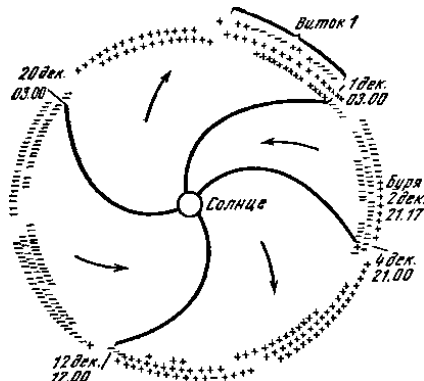
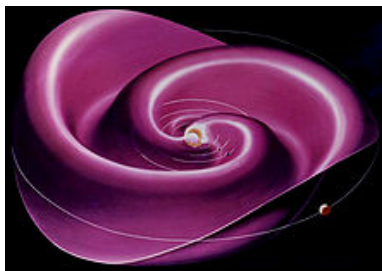
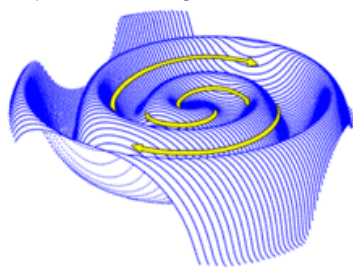


Рис. 3. Секторна структура ММП за даними штучного супутника Землі «IMP-1». Знаки «+» (від Сонця) і «-» (до Сонця) — результати трьохгодинних вимірювань напрямку ММП, стрілки — переважуючий напрям поля. Рисунок взято із роботи [37].



а)



б)

Рис. 4. Об'ємна конфігурація міжпланетного магнітного поля (а) і геліосферний струмовий шар (б)

або взагалі не витікає, або ж витікає в дуже малій кількості. Кожного разу, коли спостерігач перетинає нейтральний шар, змінюється полярність магнітного поля Сонця, і він фіксує проходження через межу сектору. Вузкий прошарок між протилежно спрямованими від Сонця магнітними полями часто називають ще *геліосферним струмовим шаром* — ГСШ (рис. 4,6), в якому струми течуть вздовж ліній, ортогональних магнітним силовим лініям. Товщина ГСШ становить ~ 10 тис. км.

Нейтральний магнітний шар не розташований точно в площині сонячного екватора. Крупномасштабне азимутальне фотосферне магнітне поле на Сонці приводить до викривлення в міжпланетному просторі екваторіального магнітного нейтрального шару. В результаті він поперемінно відхиляється на північ або на південь від площини сонячного екватора. Тому спостерігач поблизу сонячної екваторіальної області впродовж оберту Сонця фіксує потоки плазми поперемінно то з одного, то з другого боку нейтрального шару. Внаслідок цього і спостерігається секторна структура з перемінною полярністю ММП.

8. ЦИКЛІЧНІ ВАРІАЦІЇ ГАЛАКТИЧНИХ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ

Встановлення властивості космічних променів переноситися разом з потоками намагніченої плазми надає змогу пояснити процеси, що в певні проміжки часу викликають зниження на Землі інтенсивності галактичних космічних променів (які представляють ядра різних елементів з енергіями в діапазоні $10^8 - 10^{20}$ eВ) [28]. Загальний рух плазми від Сонця назовні намагається «виштовхнути» космічні промені із Сонячної системи назад в міжзоряний простір, звідки вони прийшли. Водночас магнітні поля, що переносяться потоком плазми і розширюються, адіабатично охолоджують або уповільнюють частинки космічних променів (т.зв. зворотній бетатронний ефект). В подальшому це також робить внесок в зниження швидкості рахунку детектора для будь-якого заданого енергетичного порогу реєстрації частинок. В результаті повинна спостерігатися зворотна кореляція між інтенсивністю галактичних космічних променів (ГКП) і потужністю сонячного корпускулярного випромінювання, тобто сонячною активністю. Як вперше відзначив Форбуш С. [38], саме так відбувається в дійсності, коли зниження інтенсивності ГКП спостерігається в епоху підвищеної активності Сонця в 11-річному циклі. В максимумі, а також поблизу зростаючої і спадаючої гілок сонячних циклів в фотосфері часто виникають потужні активні області. Ці активні області служать джерелами високошвидкісних потоків сонячного вітру і викидів корональної маси, які викликають зменшення потоку ГКП (т.зв. Форбуш-зниження). Тобто саме діяльність Сонця створює в певні періоди часу несприятливі умови для приходу до Землі потоку ГКП, який в протилежному випадку залишався б постійним. Внаслідок своєї незначної інтенсивності ГКП не справляють помітного впливу на динамічні процеси в міжпланетному космічному просторі. На противагу цьому, ММП чинять сильний вплив на рух ГКП, які змушені приходити до Землі із міжзоряного середовища, рухаючись вздовж магнітних силових ліній. Тому вимірювання інтенсивності ГКП може надати низку вказівок про зміни конфігурації електромагнітних полів в міжпланетному просторі.

9. ВИСНОВКИ

Джерелом енергії сонячної активності служить ядро Сонця, де в результаті реакцій термоядерного синтезу утворюються нові хімічні елементи. При цьому виділяється енергія у формі γ -квантів і частинок нейтрино. За рахунок дифузії випромінювання енергія γ -квантів поширюється до поверхні Сонця, поступово перетворюючись у менш жорстке електромагнітне випромінювання. При наближенні до поверхні стрімко зростає непрозорість речовини, в результаті чого на відстані від поверхні близько 0,3 радіуса Сонця створюються умови для виникнення конвективної нестійкості плазми. На допомогу випромінюванню в дію вступає конвективне перенесення енергії внаслідок гідродинамічних рухів. В кінцевому підсумку частина перенесеної до поверхні променистої енергії надає можливість спостерігати Сонце в різних діапазонах хвиль. Тоді як друга частина перенесеної догори енергії, зумовлена конвективними рухами, буде проявлятися на фотосферному рівні у вигляді доступних для спостережень грануляційних рухів різних масштабів.

Разом з тим, частина потоку енергії, що йде із надр Сонця, накопичується і переноситься назовні в «магнітній формі». Важливою специфічною властивістю цього високоефективного механізму магнітного перенесення енергії служать його суттєві варіації в часі, які виявляються в циклічних змінах більшості породжуваних магнітними полями явищ, які прийнято називати сонячною активністю. Специфічність цього перенесення енергії проявляється, зокрема, в нестаціонарній спалаховій конверсії магнітної енергії в тепло, а також в кінетичну енергію прискорених часток і макроскопічних (корональних) викидів плазми.

Роль полігона, де зароджуються основні процеси, відповідальні за циклічні прояви сонячної активності, відіграє конвективна зона. Саме тут в результаті механізму динамо частина кінетичної енергії гідродинамічних рухів (диференційного обертання і гіротропної турбулентної конвекції) в ході сонячного циклу переходить в енергію магнітного поля. Згенероване в сонячних глибинах глобальне магнітне поле, виходячи завдяки його магнітній плавучості на поверхню, змінює стан атмосфери Сонця, зумовлює

нерегулярну частину випромінювання і служить джерелом потужних нестаціонарних явищ в зовнішніх атмосферних шарах (фотосфері, хромосфері і короні).

Сонячна корона, згідно теоретичних досліджень київських вчених і американського астрофізика Паркера, не може знаходитися в стані гідростатичної рівноваги і повинна постійно розширюватися, породжуючи сонячний вітер (гідродинамічну гарячу корону). Внаслідок великої електропровідності гарячого газу корони глобальне магнітне поле вмерозжене в потоки плазми. Тому воно розноситься сонячним вітром в навколишній простір, формуючи міжпланетне магнітне поле. Потоки енергійних частинок сонячних космічних променів і сонячного вітру, а також структура міжпланетного магнітного поля є надзвичайно важливими параметрами для розуміння фізичних процесів в геліосфері, які служать факторами космічної погоди в міжпланетному просторі, що діють на магнітосфери планет.

Питання про фізичні механізми, що приводять до генерації глобального магнітного поля, високої температури корони і формування структури сонячного вітру, на сьогодні остаточно не з'ясовані. Шлях до їхнього вирішення полягає в побудові теоретичних моделей, що задовільно узгоджуються зі спостереженими параметрами плазми і магнітних полів, як на сонячній поверхні, так і в короні в області сформованих потоків сонячного вітру.

1. Вандакуров Ю.В. Конвекция на Солнце и 11-летний цикл. — М.: Наука, 1976. — 156 с.
2. Priest E.R. Solar Magnetohydrodynamics. — Dordrecht–Boston–London: D.Reidel Publishing Company, 1981.
3. Соловьев А.А., Киричек Е.А. Диффузная теория солнечного магнитного цикла. — Элиста–С.Петербург: Издательство Калмыцкого ГУ, 2004. — 181 с.
4. Miesch M.S. Large-scale dynamics of the convection zone and tachocline // Living Rev. Solar Phys. — 2005. — Vol. 2, No. 1. — P.1–139.
5. Филиппов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце. — М.: Физматлит, 2007. — 216 с.
6. Hathaway D.H. The solar cycle // Living Rev. Solar Phys. — 2015. — Vol. 12, No. 4. — P.1–87.
7. Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. Турбулентное динамо в астрофизике. — М.: Наука, 1980. — 352 с.
8. Zeldovich Ya.B., Ruzmaikin A.A., Sokoloff D.D. Magnetic Fields in Astrophysics. — New York: Gordon and Breach, 1983.
9. Krause F., Rädler K.-H. Mean Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory. — Oxford: Pergamon Press, Ltd., 1980. — 271 p.
10. Krivodubskij V.N. Rotational anisotropy and magnetic quenching of gyroscopic turbulence in the solar convective zone // Astron. Reports. — 1998. — Vol. 42. — P.122–126.
11. Krivodubskij V.N. The structure of the global solar magnetic field excited by the turbulent dynamo mechanism // Astron. Reports. — 2001. — Vol. 45. — P.738–745.
12. Krivodubskij V.N. Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone // Astron. Nachrichten. — 2005. — Vol. 326, No. 1. — P.61–74.
13. Krivodubskij V.N. Small scale alpha-squared effect in the solar convection zone // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. — 2015. — Vol. 31, No. 2. — P.55–64.
14. Charbonneau P. Dynamo models of the solar cycle // Living Rev. Solar Phys. — 2010. — Vol. 7, No. 3. — P.1–91.
15. Солнечно-земные связи и космическая погода (под ред. Петруковича А.А.) // Зеленый Л.М., Веселовский И.С. (ред.) Плазменная гелиогеофизика. Том II. — М.: Физматлит. — 2008. — 560 с.
16. Кременецкий И.О., Черемних О.К. Космична погода: механізми і прояви. — Київ: Наукова думка, 2009. — 144 с.
17. Парновский А.С., Ермолаев Ю.И., Жук И.Т. Космическая погода: история исследования и прогнозирование // Космична наука і технологія. — 2010. — Т. 16, № 1. — С.90–99.
18. Кузнецов В.Д. Солнечно-земная физика и ее приложения // УФН. — 2012. — Т. 182, № 3. — С.327–326.
19. Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии. — 2014. — № 3(6). — С.327–326.
20. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. — М.: Мысль, 1976. — 368 с.
21. Гибсон Э. Спокойное Солнце. — М.: Мир, 1977. — 408 с.
22. Störmer C. La Theorie corpusculaire des aurores boreales // L'Astronomie. — 1918. — Vol. 32. — P.153–159; 200–205.
23. Chapman S., Ferraro V.C.F. // Terrest. Magn. and Atmosph. Elec. — 1931. — Vol. 77. — P.171.
24. Chapman S. The viscosity and thermal conductivity of a completely ionized gas // Astrophys. J. — 1954. — Vol. 120. — P.151.
25. Biermann L. Über die Ursache der chromosphärischen Turbulenz und des UV-Exzesses der Sonnenstrahlung // Zs. f. Ap. — 1948. — Vol. 25. — P.161.
26. Biermann L. // Zs. f. Naturforsch. — 1952. — Vol. 7a. — P.127.
27. Parker E.N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // Astrophys. J. — 1958. — Vol. 128. — P.664–676.

28. Паркер Е.Н. Динамические процессы в межпланетной среде. — М.: Мир, 1965. — 364 с.
29. Гелиосфера (под ред Веселовского И.С., Ермолаева Ю.И.) // Зеленый Л.М., Веселовский И.С. (ред.) Плазменная гелиогеофизика. Том I. — М.: Физматлит. — 2008. — 560 с.
30. Всехсвятский С.К., Никольский Г.М., Пономарев Е.А., Чередниченко В.И. К вопросу о корпускулярном излучении Солнца // Астрон. журнал. — 1955. — Т. 32. — С.165–17.
31. Пономарев Е.А. К теории солнечной короны: Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. — Киев: Киевский университет, 1957. — 233 с.
32. Пудовкин М.И. Солнечный ветер // Соросовский образовательный журнал. — 1996. — № 12. — С.87–94.
33. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976.
34. Proelss G.W. Physics of the Earth's Space Environment. — Berlin: Springer, 2004.
35. Gazis P.R. Solar cycle variation in the heliosphere // Rev. Geophys. — 1996. — Vol. 34, No. 3. — P.379–402.
36. Sheeley N.R., Wang Y.-M., Hawley S.H., et al. Measurements of flow speeds in the corona between 2 and $30R_{\odot}$ // Astroph. J. — 1997. — Vol. 484, No. 1. — P.472–478.
37. Wilcox J.M., Ness N.F. Extension of the photospheric magnetic field into interplanetary space // Astron. J. — 1965. — Vol. 70. — P.333.
38. Forbush S.E. World-wide cosmic-ray variations, 1937–1952 // J. Geophys. Res. — 1954. — Vol. 59, No. 4. — P.525–542.

Источники солнечной энергии и межпланетное магнитное поле

Криводубский В.Н.

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко,
04053, г. Киев, ул. Обсерваторная, 3

Проанализированы источники энергии солнечной активности. Первичным источником солнечной энергии служит ядро Солнца, где в результате реакций термоядерного синтеза выделяется энергия в форме γ -квантов и частиц нейтрино, которые распространяются наружу. При приближении к поверхности вследствие падения температуры и роста непрозрачности вещества полностью ионизированная солнечная плазма начиная с определенных глубин переходит в состояние частичной ионизации. В результате этого на расстоянии около 0,3 солнечного радиуса от поверхности начинает выполняться критерий Шварцшильда возникновения конвективного переноса энергии вследствие гидродинамических движений. Выше этой границы лежит слой конвективной турбулентности, в котором энергия переносится в основном движущимся веществом, а не излучением. Его называют конвективной зоной. В конечном итоге часть перенесенной к поверхности лучистой энергии позволяет наблюдать Солнце в разных диапазонах волн, тогда как вторая часть перенесенной вверх энергии, которая обусловлена конвективными движениями, будет проявляться на фотосферном уровне в виде доступных для наблюдений грануляционных движений различных масштабов. Вместе с тем часть потока энергии, идущей из недр Солнца, накапливается и переносится вверх в «магнитной форме». Важным специфическим свойством этого высокоэффективного механизма магнитного переноса энергии служат его существенные вариации во времени, которые обнаруживаются в циклических изменениях большинства порождаемых магнитными полями явлений, называемых солнечной активностью. Специфичность этого переноса энергии проявляется в нестационарной вспышечной конверсии магнитной энергии в тепло, а также в кинетическую энергию ускоренных частиц и макроскопических (корональных) выбросов плазмы. Роль полигона, где зарождаются основные процессы, ответственные за циклические проявления солнечной активности, играет конвективная зона. В глубинах конвективной зоны в результате механизма динамо некоторая часть кинетической энергии гидродинамических движений (дифференциального вращения и гиротропной турбулентной конвекции) превращается в магнитную энергию в ходе солнечного цикла, усиливая тем самым слабое магнитное поле Солнца реликтового происхождения. Сгенерированное в глубинах глобальное магнитное поле переносится к солнечной поверхности благодаря его магнитной плавучести. Поверхностные магнитные структуры меняют состояние атмосферы Солнца, вызывают нерегулярную часть излучения и служат источником мощных нестационарных явлений во внешних атмосферных слоях (фотосфере, хромосфере и короне). Сделан обзор современной концепции таких явлений, как горячая солнечная корона, солнечный ветер и межпланетное магнитное поле, которые формируют космическую погоду в межпланетном пространстве. Отмечен вклад «киевской корональной школы» С.К.Всехсвятского в становление концепции динамической короны Солнца.

Ключевые слова: Солнце; излучение; конвекция; магнитная энергия; космическая погода; корона; солнечный ветер; межпланетные магнитные поля.

Sources of solar energy and interplanetary magnetic field

Krivodubskij V.N.

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Observatorna str. 3, 04053 Kyiv, Ukraine

The sources of energy of solar activity are analyzed. The primary source of solar energy is the core of the Sun, where as a result of the reactions of thermonuclear fusion, energy is released in the form of γ -quanta and neutrino particles that propagate outward. When approaching the surface due to the fall in temperature and the increase in the opacity of the substance, the fully ionized solar plasma, from certain depths, passes into the state of partial ionization. As a result, a Schwarzschild criterion of the emergence of a convective energy transfer due to hydrodynamic motions begins to run at a distance of 0.3 solar radius from the surface. Above this boundary lies a layer of convective turbulence, in which energy is transferred mainly by a moving substance, and not by radiation. It is called the convective zone. Ultimately, the part of the radiant energy transferred to the surface gives the opportunity to observe the Sun in different wavelength ranges. While the second part of the upward energy, which is due to convective motions, will manifest itself at the

photospheric level in the form of granulation movements of various scales accessible for observation. However, part of the flow of energy coming from the interior of the Sun, accumulates and is carried upwards in the “magnetic form”. An important specific property of this highly effective mechanism of magnetic energy transfer is its significant variations in time, which are manifested in cyclic changes of the majority of phenomena generated by magnetic fields, called solar activity. The specificity of this energy transfer is manifested in the non-stationary flare conversion of magnetic energy into heat, as well as in the kinetic energy of accelerated particles and macroscopic (coronal) plasma emissions. The role of the landfill, where the main processes responsible for cyclic manifestations of solar activity originate, is played by the convective zone. In the depths of the convective zone, as a result of the dynamo mechanism, some of the kinetic energy of the hydrodynamic motions (differential rotation and gyrotropic turbulent convection) is converted into magnetic energy during the solar cycle, thereby strengthening the weak magnetic field of the Sun of relic origin. The global magnetic field generated in depths is transferred to the solar surface due to its magnetic buoyancy. Surface magnetic structures change the state of the Sun’s atmosphere, cause an irregular part of the radiation and serve as a source of powerful non-stationary phenomena in the outer atmospheric layers (photosphere, chromosphere and corona). The modern concept of such phenomena as hot solar corona, solar wind and interplanetary magnetic field that form space weather in the interplanetary space is reviewed. The contribution of the “Kiev coronal school” of Vsekhsviatskij S.K. to the development of the concept of the dynamic corona of the Sun is noted.

Keywords: Sun; radiation; convection; magnetic energy; space weather; corona; solar wind; interplanetary magnetic fields.

Надійшла до редакції / Received	2.08.2017
Виправлена авторами / Revised	1.11.2017
Прийнята до друку / Accepted	8.11.2017