

тационно-линзовой системы. В статье проведено моделирование микролинзированных профилей спектральных линий, которые формируются в акреционных дисках АЯГ. Вычисления проведены в приближении линейной каустики. Временная зависимость профиля линии определяется углом между каустикой и осью диска, что даёт принципиальную возможность оценить ориентацию каустики.

Ключевые слова: гравитационное микролинзирование, релятивистские профили спектральных линий, активные ядра галактик.

УДК 523.98

В. Криводубський, д-р фіз.-мат. наук  
Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, Київ

## РОЛЬ КОНВЕКТИВНОЇ ЗОНИ У ЗБУДЖЕННІ МАГНІТНОЇ АКТИВНОСТІ СОНЦЯ

Проаналізовано джерела енергії сонячної активності. Первісним джерелом сонячної енергії служить ядро Сонця, де внаслідок реакцій термоядерного синтезу виділяється енергія у формі  $\gamma$ -квантів і частинок нейтрино, які поширюються назовні. При наближенні до поверхні стрімко зменшується температура і водночас зростає непрозорість речовини променистої зони, внаслідок чого на відстані від поверхні близько 0,3 радіуса Сонця створюються умови для збудження конвективного перенесення енергії. Вище цієї межі лежить шар, який називають конвективною зоною. Існування і локалізацію конвективної зони Сонця визначають двома причинами: перша – структурний (променистий) градієнт температури збільшується через зростання непрозорості при падінні температури; друга – адіабатичний градієнт температури спливаючих елементів зменшує свою величину в зонах часткової іонізації водню і гелію.

Саме конвективна зона відіграє роль полігону, де зароджуються основні процеси, відповідальні за циклічні вияви активності Сонця. Разом із тим, частина конвективного потоку енергії, що йде із надр Сонця, накопичується і переноситься назовні в "магнітній формі". Специфічність магнітного перенесення енергії виявляється в циклічних змінах більшості породжуваних магнітними полями явищ, які прийнято називати магнітною активністю Сонця. Основним механізмом, що забезпечує циклічний характер коливань магнітної активності, є турбулентне динамо, локалізоване в конвективній зоні.

Найсприятливішим місцем для генерації тороїдального магнітного поля, від якого залежить інтенсивність плямостворення, служать глибинні шари поблизу дна конвективної зони, що охоплюють шар проникної конвекції (конвективний овершут) і тахоклін. В овершуті створюються необхідні умови для формування шару тривалого утримання магнітних полів, тоді як у тахокліні внаслідок різкого спадання кутової швидкості у присутності слабого полоїдального поля ефективно генерується потужне тороїдальне поле. Паркерівська плавучість цього поля з часом переважає ефекти антиплавучості, внаслідок чого поле зрештою підіймається на поверхню і формує тим самим біполярні групи сонячних плям. Важливим чинником глибинних шарів служить також спрямована до екватору меридіональна течія, яка в межах моделі гідромагнітного динамо забезпечує міграцію тороїдальних полів від високих широт до низьких. Відзначено останні дослідження автора про роль глибинних шарів сонячної конвективної зони у поясненні спостереженого явища подвійних максимумів циклу сонячних плям.

Ключові слова: Сонце, термоядерний синтез, випромінювання, конвекція, магнітна енергія, сонячна активність, овершут, тахоклін, магнітна плавучість, меридіональна циркуляція, турбулентне динамо, магнітний цикл.

**Вступ.** Наше денне світило Сонце – особлива для нас зоря, адже саме вона відіграла активну роль у процесі формування сонячної системи. Ця зоря зумовила фізичні умови на Землі й інших планетах. Несучи світло і тепло, Сонце сприяло виникненню всього живого на Землі і, зрештою, появи людини. Сонячна енергія впродовж тривалого часу підтримувала еволюцію біосфери і продовжує нині підтримувати життя на Землі. У другій половині ХХ ст. в період активного вивчення й освоєння космосу сформувався новий науковий напрям досліджень залежностей між геліофізичними і геофізичними процесами, що отримав назву "космічна погода". Суть нового наукового напрямку полягає у вивченні впливу зовнішніх джерел енергії, випромінювання та потоків речовини через міжпланетне середовище на навколосонячний простір (магнітосферу, іоносферу й атмосферу Землі) і реакції захисних оболонок Землі на цей вплив. Усвідомлення фізичної залежності докільця від сонячної енергії зумовлює наш інтерес до вивчення природи джерел цієї енергії.

**Генерація і променисте перенесення сонячної енергії.** Оскільки з допомогою телескопа неможливо безпосередньо заглянути в надра Сонця, то наші уявлення про його внутрішню структуру ґрунтуються на теоретичних модельних розрахунках. Зазвичай усередині Сонця дослідники тривалий час виокремлювали три ділянки: ядро, радіативну (променисту) зону і конвективну зону (т. зв. стандартна модель Сонця) [1]. Згідно із сучасними досягненнями у вивченні сонячних надр перехідну ділянку між променистою зоною і конвективною зоною необхідно доповнити двома тонкими прошарками, які у геліофізиків отримали назви конвективний овершут (шар проникної конвекції) [2–6] і тахоклін (шар спадання кутової швидкості) [7].

Первісним джерелом енергії Сонця є ядро, де за надзвичайно високих температур ( $\sim 1,5 \cdot 10^7$  К) плазма перебуває в повністю іонізованому стані. За умов таких високих температур і високого тиску ( $250 \cdot 10^9$  атм) у ядрі внаслідок реакцій термоядерного синтезу утворюються нові хімічні елементи і виділяється 99 % сонячної енергії. Основна реакція: протон-протонний цикл, внаслідок якого із чотирьох протонів утворюється атом гелію. Оскільки атомна маса гелію менша атомної маси чотирьох протонів, то дефіцит маси **випромінюється** у вигляді високочастотних  $\gamma$ -квантів і частинок нейтрино. У шарах, що оточують ядро, немає власних джерел енергії, тому тут відбувається тільки радіальне перенесення енергії. Вивільнена в ядрі енергія поступово поширюється (дифундує) до поверхні Сонця у вигляді електромагнітного випромінювання, за винятком невеликої її частки, що переноситься нейтрино. Ділянку поширення вивільненої енергії прийнято називати **променистою зоною**. Густина сонячної плазми у променистій зоні така велика, що на цьому шляху випромінювання зазнає значних складнощів у своєму поширенні. Внаслідок цього відбуваються процеси **перевипромінювання**:  $\gamma$ -кванти спочатку перетворюються в рентгенівські хвилі, потім 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 диску Сонця. Шари, де формується неперервний спектр оптичного випромінювання, що доходить до спостерігача, геліофізики називають фотосферою (сферою світла) і приймають її кутові розміри за розміри Сонця. Відстань від центру Сонця до поверхні, що становить  $\sim 700$  тис. км (трохи менше

двох відстаней від Землі до Місяця), електромагнітне випромінювання долає за час близько одного мільйона років (тоді як частинки нейтрино досягають поверхні впродовж усього приблизно двох секунд).

Зауважимо, що слід розрізняти терміни *радіація* й *іrrадіація*. У найширшому сенсі слова, **радіація** (лат. "съяво", "випромінювання") – це процес поширення енергії у просторі у формі різних хвиль і частинок. Разом із тим, інтенсивність сонячного випромінювання, що досягає Землі, змінюється залежно від часу доби, року, місця розташування і погодних умов. Загальну кількість енергії, підраховану за певний проміжок часу, називають **іrrадіацією** (іншими словами: "*прихід*" або "*доза сонячної радіації*") і показує, наскільки потужним було сонячне випромінювання. Варто також розуміти відмінність між такими термінами, як *радіація* і *радіоактивність*. Якщо перше можна застосувати до іонізуючого випромінювання, що перебуває 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.

Слід також пам'ятати про відмінність понять **сонячне світло** (потік фотонів, який долітає від Сонця до Землі в середньому за 499 с) і **сонячний вітер** (потік іонізованих частинок, що долає шлях від Сонця до Землі за 2–3 доби). Зокрема, саме ефект тиску сонячного світла (*а не сонячного вітру*) використовують у проєктах так званих **сонячних вітрил** космічних кораблів для міжпланетних подорожей. Тоді ж як двигун для космічного апарату, який використовує як джерело тяги імпульс іонів сонячного вітру, називають **електричним вітрилом**.

При наближенні до поверхні Сонця стрімко зростає непрозорість речовини, внаслідок чого умови для дифузії випромінювання і перенесення теплоти погіршуються в такій мірі, що сонячна плазма починає перегріватися. Якби не гравітація, то все закінчилося б грандіозним вибухом перегрітої оболонки Сонця. Однак саме завдяки гравітації в дію вступає надзвичайно важливий процес: перемішування перегрітої речовини у глибинах Сонця із холоднішою речовиною ближче до поверхні (т. зв. **конвекція**).

**Конвективне перенесення енергії.** Конвекцією називають просторове перенесення будь-яких властивостей суцільного середовища при його русі. Конвективні рухи, що виникають за наявності просторової неоднорідності густини рідини або газу, які перебувають у полі сил тяжіння, називають вільною конвекцією. Коротко можна сказати так: конвекція зумовлюється різницею питомих ваг нагрітих і холодних шарів речовини в полі тяжіння. Якщо зміни густини відбуваються тільки за рахунок зміни температури, то конвекцію називають термічною. Природна термічна конвекція є одним із видів гравітаційної нестійкості. Якщо шар газу або рідини підігрівається знизу (або охолоджується зверху), і теплопровідність не може забезпечити вирівнювання температури, то це вирівнювання здійснюється **вертикальними макрорухами**. Конвекція служить переважачим способом перенесення енергії тоді, коли температура в елементі газу, що піднімається, спадає повільніше, ніж у навколишньому середовищі, внаслідок чого елемент, який піднімається, стає менш щільним і набуває властивості архімедової плавучості. Тобто, нижні шари середовища нагріваються, стають легшими і спливають, а верхні шари, навпаки, охолоджуються, стають важчими і занурюються донизу, після чого процес повторюється знову і знову. За певних умов процес перемішування самоорганізовується у структуру окремих вихорів, внаслідок чого утворюється більш або менш упорядкована структура із конвективних комірок.

Експериментально явище термічної конвекції в рідині було відкрито Г. Бенаром у 1900 р. [8] на прикладі підігрітої знизу гарячої води, на яку зверху наливали тонкий шар мінерального масла. Для виявлення рухів рідини до масла підмішували дрібні ошурки алюмінію. При досягненні критичної безрозмірної різниці температур біля верхньої і нижньої поверхонь рідини в ній виникали вертикальні вихрові течії й утворювалися шестигранні комірки. У центрі комірки рідина рухалася вгору, а поблизу її країв – донизу. В усіх комірках мав місце один і той самий процес. Таку циркуляційну течію називають конвекцією Релея – Бенара, оскільки теоретичний аналіз явища (1916) належить Релею (Джон Вільям Стретт, він же лорд Релей із 1873) [9]. Спостереження показують, що у природі існують два різних типи рухів рідини. Перший – шарувата упорядкована течія – ламінарний рух, за якого шари рідини ковзають один повз одного паралельно напрямку течії, не змішуючись між собою. Другий – турбулентна нерегульована течія, за якої частинки рідини рухаються по складних траєкторіях і при цьому відбувається інтенсивне перемішування між шарами рухомої рідини. Турбулентність була експериментально відкрита Рейнольдсом у 1883 р. [10]. Зазвичай турбулентний режим течії настає при перевищенні деякого критичного значення числа Рейнольдса (яке представляє собою відношення величин турбулентної і газокінетичної в'язкостей), що залежить від конкретного виду течії. Ламінарні і турбулентні рухи зазвичай ускладнюються природною конвекцією, що виникає, як зазначено вище, внаслідок різниці температур по перерізу течії. Процеси конвективного перенесення, що представляють практичний інтерес, відбуваються зазвичай в умовах турбулентних рухів середовища. Перехід від ламінарного режиму конвекції до турбулентної конвекції відбувається за збільшення безрозмірного числа Релея  $Re$ , яке становить собою відношення імпульсу підйомної сили до сили, що гальмує конвективні рухи [9]. На елемент, що піднімається, діє спрямована вгору сила, яка залежить від різниці температур усередині і зовні цього елемента. Разом із тим, на рухомий елемент діє сила тертя (в'язкість, що може бути газокінетичною або ж турбулентною), яка гальмує рухи. Від співвідношення цих сил залежить структура конвекції. Якщо сила в'язкості переважає підйомну силу, то число  $Re$  буде малим і конвекція не виникатиме. У випадку, коли ці сили порівнянні, то рух газу вгору має спокійний характер із майже сталою швидкістю. Якщо число Релея перевищує певну критичну величину  $Re_{кр} \sim 10^3$ , то буде збудуватися конвекція, яка в міру зростання  $Re$  набуває вигляду правильної коміркової структури. Зокрема, стаціонарна конвекція Бенара збуджується за умови  $Re_{кр} < Re < 10^5$ .

**Конвективна зона Сонця.** Розглянемо детальніше питання про виникнення конвекції на Сонці [11–15]. Як зазначено вище, енергія Сонця виділяється в його ядрі у вигляді  $\gamma$ -квантів, що утворюються під час термоядерних реакцій синтезу хімічних елементів. У радіативній зоні відбувається тільки радіальне перенесення енергії, виділеної в ядрі, завдяки процесам дифузії випромінювання: кванти світла 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 порівняно з ядром. Звідси випливає **два надзвичайно важливі наслідки**. *Перше*, з падінням температури внаслідок процесів фотоіонізації в газі з'являється багато *віль-*

них електронів, що рухаються досить повільно для того, щоб ядра водню, гелію або важчих хімічних елементів (таких як вуглець, азот, кисень, кальцій і залізо) могли захопити їх у зв'язані стани, утворюючи атоми. Друге, при зміщенні до поверхні фотони дедалі частіше поглинаються зростаючою кількістю атомів, внаслідок чого створюється дедалі більший опір дифузії випромінювання (погіршуються умови перенесення енергії випромінюванням – тобто газ стає менш прозорим для випромінювання), а променистий (реальний, структурний) радіальний 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 у стан *часткової іонізації* водню, гелію і важчих елементів. У найглибших шарах частково іонізованого газу внаслідок рекомбінації вільних електронів із ядрами й іонами з'являються іони важчих елементів, що сильно поглинають випромінювання. Це призводить до значного збільшення коефіцієнту поглинання  $\kappa$  і тим самим до зростання променистого (структурного) радіального градієнту температури  $|dT/dr|_{\text{пром}}$ , величина якого пропорційна коефіцієнту  $\kappa$  (тобто відбувається різке падіння температури в радіальному напрямку). Внаслідок цього створюються умови для збудження **конвективної нестійкості**. Для виникнення конвекції необхідно, щоб зменшення температури у спливаючому елементі, якщо він не обмінюється теплотою з атмосферою (**адіабатичний процес**), відбувалося повільніше, ніж в атмосфері на тій же висоті. 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 адіабатичне значення радіального градієнту  $|dT/dr|_{\text{ад}}$  усередині якогось елемента газу, який повільно зміщується знизу вгору без додаткового нагрівання зовні. З огляду на це його рух угору прискорюється і збуджується турбулентна конвекція. Умовою виникнення конвекції є нерівність

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

що відома під назвою **критерію Шварцшильда** [16]. Для виконання цієї умови необхідно, щоб газ, який піднімається, незважаючи на його охолодження, залишався гарячішим ніж навколишній газ. Це буде тоді, коли температура середовища падає з висотою швидше, ніж в елементі газу, що адіабатично піднімається і розширюється.

Обернена нерівність сприяє стійкості: при її виконанні об'єм, що змістився випадково вгору, буде важчим навколишньої речовини і не зможе рухатися далі вгору, а буде коливатися навколо положення його рівноваги. Саме за такої умови у променистій зоні виникають радіальні коливання речовини відносно положення гравітаційної рівноваги з частотою Брунта – Вайсяля. Вони викликаються хвилями, що збуджуються ефектами плавучості, зумовленими гравітацією. Тому ці хвилі отримали назву внутрішні гравітаційні хвилі [17]. Зауважимо, що їх не слід плутати з відкритими недавно космологічними гравітаційними хвилями.

Зазначимо, що вимога, згідно з якою для збудження конвекції необхідно, щоб число Релея переважало певне критичне значення  $Re_{\text{кр}}$ , є більш строга, ніж критерій Шварцшильда (1). Критерій Шварцшильда є необхідною, але недостатньою умовою виникнення конвекції. Та обставина, що число  $Re$  має перевищувати критичну величину  $Re_{\text{кр}}$ , означає: перш ніж наступить конвективний режим, підйомна сила, що розвинулася, має стати більшою сили гальмування. З огляду на це достатньою умовою встановлення стаціонарного режиму конвекції є вимога  $Re \gg Re_{\text{кр}}$ .

На Сонці конвективна нестійкість настає на глибині близько 200 тис. км, де температура спадає до величини  $\sim 2 \cdot 10^6$  К, яка вже недостатня для повної іонізації *важких елементів*, тому тут розпочинається ділянка *їх часткової іонізації*. Вище цієї межі лежить шар конвективної турбулентності, у якому енергія переноситься зазвичай рухомою речовиною, а не випромінюванням. Його називають **конвективною зоною**. Поблизу зовнішнього шару конвективної зони вступає в дію інший чинник, пов'язаний із ділянками *часткової іонізації водню і гелію*, який сприяє підсиленню нестійкості. У цих ділянках об'єм газу, що повільно рухається знизу вгору, де тиск менший, буде розширюватися і внаслідок цього охолоджуватися, навіть якщо він і не віддає тепло в зовнішній простір. Таке охолодження називають адіабатичним. Водночас об'єм газу, що піднімається, незважаючи на його охолодження, буде нагріватися за рахунок енергії, яка вивільнюється при рекомбінації електронів із ядрами водню і гелію в зонах їхньої часткової іонізації. Тому температура цього елемента газу буде падати не так швидко, як за відсутності рекомбінації, що і призводить до зменшення величини  $|dT/dr|_{\text{ад}}$ . Внаслідок такого нагрівання, газ, що піднімається, виявляється *більш гарячим* і, що ще більш важливо, внаслідок поперечного балансу тисків *менш щільним* (легшим), ніж газ навколишнього середовища. Завдяки цьому створюються умови для підсилення критерію конвективної нестійкості (1). Такого ж роду нестійкість властива і для елемента газу, що випадково починає рухатися згори донизу. У цьому випадку ключову роль відіграє процес іонізації водню і гелію при стисненні елемента газу, який опускається донизу, що призводить до охолодження газу при його низхідному русі. На важливу роль зон часткової іонізації хімічних елементів у збудженні конвекції в надрах зірок уперше в 1930 р. звернув увагу А. Унзольд [18]. Зауважимо, що насправді в СКЗ мають місце три способи перенесення теплоти: теплопровідність, конвекція і радіація. Кінетична енергія конвективних елементів здобувається за рахунок теплової енергії випромінювання, що йде знизу і підтримує різницю температур всупереч згладжувальному впливу конвекції, яка завжди зменшує реальний структурний градієнт температури і намагається наблизити його до адіабатичного значення.

Перенесення теплоти в зоні конвекції значно ефективніше, ніж у стійких шарах, тому радіальний градієнт температури в конвективній зоні  $|dT/dr|_{\text{конв}}$  виявляється малим. Цим пояснюють велику товщину конвективної зони Сонця: для повної іонізації гелію за великого тиску потрібна висока температура, отож за малого температурного градієнту потрібно пройти великий шлях від поверхні вниз, щоб потрапити в ділянку високих температур. Чим нижча температура зірки, тим більша товщина її конвективної зони; у холодних червоних зірок її товщина сягає майже половини радіусу. Навпаки, у гарячих зірок спектрального класу А водень помітно іонізований уже на поверхні, тому навіть на невеликій глибині водень, а потім і гелій повністю іонізовані, внаслідок чого товщина їхньої конвективної зони виявляється малою. Отже, **конвекція** є переважаючим способом перенесення енергії за умови, коли температура в елементі газу, що піднімається, спадає повільніше, ніж у навколишньому середовищі, внаслідок чого цей конвективний елемент виявляється менш щільним і набуває властивості плавучості. Він переносить своє надлишкове тепло вгору і передає частину його навколишньому середовищу за допомогою випромінювання, а розсм-

окутуючись і руйнуючись – також шляхом безпосереднього перемішування. Після цього охолоджені залишки елемента, ставши щільнішими за навколишнє середовище, опускаються у глибокі і гарячі шари, і весь процес повториться.

За виникнення конвективного турбулентного шару на Сонці *несуть відповідальність* насамперед рекомбінації вільних електронів із ядрами й іонами важких елементів у *глибоких шарах* іонізованого газу (що викликає зростання непрозорості середовища та зростання структурного променистого градієнту температури  $|dT/dr|_{\text{пром}}$ ), а також збільшення числа рекомбінацій у ділянках часткової іонізації водню і гелію *ближче до поверхні* (які приводять до пониження адіабатичного градієнту температури  $|dT/dr|_{\text{ад}}$  всередині спливаючого елемента газу). Таким чином, існування і локалізація конвективної зони Сонця визначається двома причинами: перша – структурний (променистий) градієнт температури *збільшується* через зростання непрозорості при падінні температури; друга – адіабатичний градієнт температури спливаючих елементів *зменшує* своє значення в зонах часткової іонізації водню і гелію.

При наближенні до поверхні стрімко зростає непрозорість речовини, внаслідок чого на відстані від поверхні близько 0,3 радіуса Сонця створюються необхідні і достатні умови для виникнення конвективної нестійкості плазми. На допомогу випромінюванню в дію вступає *конвективне перенесення енергії* внаслідок гідродинамічних рухів. Поблизу поверхні більша частина потоку сонячної енергії перетворюється в енергію турбулентних конвективних рухів плазми і в такій формі доходить до видимої границі Сонця. Тут енергія знову перетворюється в попередню світлову і теплову форми. Ця частина перенесеної до поверхні *променистої* енергії надає можливість спостерігати Сонце в різних діапазонах хвиль. Тоді як друга частина перенесеної вгору енергії, зумовлена *конвективними* рухами, буде виявлятися на фотосферному рівні у вигляді доступних для спостережень грануляційних рухів різних масштабів. При розгляді процесу збудження конвекції в ролі гальмівної сили слід брати до уваги турбулентну в'язкість. Розрахунки чисел Релея в цьому випадку приводять до значень, що відповідають стаціонарній конвекції Бенара.

Оскільки конвективні комірки виходять на поверхню, то їхнє існування впливає не тільки із викладеної концепції, але й із прямих спостережень поверхневих явищ. Спостереження свідчать, що в поверхневій конвекції переважають комірки чотирьох цілком чітко виділених масштабів, що відповідають *грануляції, мезогрануляції, супергрануляції і гігантським коміркам* [1]. Вважають, що перші три типи конвективних комірок виникають як наслідок іонізації атомів водню і гелію, і що ці комірки мають масштаби порівнянні із глибинами, на яких відбуваються процеси іонізації. Водень стає сильно іонізованим на глибині 1 000 км під фотосферою, а гелій стає на 90 % однократно і двократно іонізованим на глибинах 5 000 – 10 000 і 30 000 км, що відповідає горизонтальним розмірам гранул, мезогранул і супергранул. Звідси випливає, що чим вище до поверхні виникає конвективний елемент, тим менші його розміри. Оскільки в сонячній плазмі постійно виникають неоднорідності температури і густини в масштабах природної неоднорідності середовища, які сумірні з т. зв. шкалою висот (висотою однорідної атмосфери), то розміри конвективних елементів на певній глибині в СКЗ також сумірні із шкалою висот на цій глибині. Існування гігантських комірок встановлено менш надійно. Як вважають, їхні типові розміри порівнянні із глибиною конвективної зони. Вони можуть визначати структуру великомасштабних магнітних полів на поверхні і розподіл волокон.

Крім конвективних рухів, на поверхні Сонця спостерігаються також періодичні вертикальні рухи із характерними розмірами, більшими розмірів гранул (~5 000 – 10 000 км). Зони, що коливаються, рівномірно розподілені по сонячному диску, у кожний даний момент часу 2/3 поверхні Сонця беруть участь у коливаннях. Розподіл швидкостей газу, отриманий із вимірювань доплерівських зміщень спектральних ліній, показав, що на зазначеній ділянці газ піднімається й опускається зі швидкістю ~ 0,4 км/с. Частотний спектр вертикальних коливань досить широкий (інтервал періодів становить 150–400 с), але максимуму спектра відповідає період 300 с, тому їх прийнято називати п'ятихвилинними коливаннями [17]. Найімовірніше пояснення п'ятихвилинних коливань полягає в тому, що їх викликають резонансні стоячі акустичні хвилі, які захоплені акустичним резонатором у глибоких підфотосферних шарах Сонця. Щонайбільше загально визнаним механізмом збудження п'ятихвилинних коливань є стохастичний механізм збудження коливань турбулентною конвекцією. Фізична суть спостережуваного явища радіальних коливань поверхні Сонця полягає в тому, що постійні хвильові рухи, подібно до сейсмічних хвиль на Землі, потрясають сонячні надра. Спостережені на сонячній поверхні коливання внаслідок розв'язання фахівцями обернених задач дають важливу інформацію про його внутрішню структуру, зокрема про внутрішнє обертання Сонця, яке відіграє кардинальну роль у збудженні тороїдального магнітного поля в межах моделей турбулентного динамо. Розділ геліофізики, у якому вивчають внутрішню будову Сонця на основі даних про спектр коливань його поверхневих шарів, називають геліосейсмологією.

**Магнітне перенесення енергії.** Однак у сонячних надрах поряд із висвітленими вище двома основними механізмами перенесення енергії *існує ще один чинник*, який бере активну участь у процесах перенесення енергії. Цим чинником є магнітне поле. Частина конвективного потоку енергії, що йде із надр Сонця, накопичується і переноситься назовні в *"магнітній формі"*. Саме параметрами магнітного поля, величиною його магнітної індукції, просторовою структурою і часовою еволюцією зумовлюються як існування, так й основні властивості сонячних активних утворень. На Сонці *змінне магнітне поле* служить одним із специфічних високоефективних механізмів перенесення енергії, який має вигляд своєрідного нелінійного відгуку Сонця на конвективний потік енергії, що проходить через його шари [13]. Специфічність цього перенесення енергії виявляється в нагріванні до високих температур верхніх шарів сонячної атмосфери (за рахунок електричних струмів і МГД-хвиль), а також у нестационарній спалаховій конверсії магнітної енергії в тепло, у кінетичну енергію прискорених часток і макроскопічних викидів плазми (т. зв. корональних викидів маси). У сильно розріджених верхніх шарах сонячної атмосфери магнітна енергія вивільнюється, зумовлюючи тим самим спостережену інверсію температури у хромосфері і короні. Надлишок накопиченої магнітної енергії скидається у міжпланетний простір у процесах сонячних спалахів і корональних викидів маси. Другою специфічною властивістю магнітного перенесення енергії є його *суттєві варіації в часі*, які виявляються в *циклічних змінах* більшості явищ, породжуваних магнітними полями. Середній період магнітних циклічних змін становить 22 роки і складається із двох 11-річних циклів сонячних плям Швабе – Вольфа [19]. На Сонці весь комплекс магнітних явищ, що містять у собі плямоутворюючу, спалахову, хвильову й інші форми (факели, протуберанці, корональні викиди маси) виявив нестационарних процесів, прийнято називати *сонячною активністю*.

Нестаціонарні процеси на Сонці переважно пов'язані з локальними тонкоструктурними (дискретними) магнітними полями активних зон. Разом із тим, в основі практично будь-яких теорій виникнення сонячного магнетизму лежить концепція великомасштабного (глобального) поля. Згідно із сучасними уявленнями глобальне магнітне поле Сонця складається із трьох компонент [20–22]. Перша компонента – аксіально-симетричне слабе полоїдальне (меридіональне) поле реліктового походження  $\mathbf{V}_r$ , силові лінії якого, виходячи на сонячну поверхню, очевидно, формують фонові магнітні поля. Друга аксіально-симетрична компонента – це глибинне сильне тороїдальне (азимутальне) поле  $\mathbf{V}_t$ , яке при спливанні на сонячну поверхню зумовлює інтенсивність плямоутворення. При спостереженнях ми бачимо лише викликані магнітною плавучістю випадкові локальні опуклості силових трубок тороїдального поля, що виявляються на сонячній поверхні в "королівській зоні" у вигляді магнітних біполярних груп плям. Третя магнітна компонента лежить у площині сонячного екватора і пов'язана з магнітними полями на сонячній поверхні. Вона має секторну структуру і визначає міжпланетне магнітне поле. Спостереження свідчать, що, незважаючи на ясно виражені випадкові флуктуації в еволюції сонячного магнетизму, полоїдальна і тороїдальна компоненти поля осцилюють у часі за величиною і знаком із середнім періодом близько 22 роки у протифазі. Полоїдальне поле змінює свою полярність (проходить через нульовий стан) в епохи максимумів сонячних плям, коли тороїдальне поле найбільш потужне, і, навпаки, полоїдальне поле досягає свого максимуму в епоху мінімумів активності плям (магнітний цикл Хейла) [19]. Тому очевидно, що глобальні магнітні компоненти пов'язані між собою і збуджуються, напевно, одним процесом, який має коливальний циклічний характер.

**Турбулентне магнітне динамо.** Роль полігона, де зароджуються основні процеси, відповідальні за циклічні явища сонячної активності, виконує конвективна зона. Згідно із сучасними поглядами, що сформувалися на основі спостережень і теоретичних уявлень, практично всі теорії циклічних магнітних змін на Сонці базуються на концепції збудження глобального магнетизму внаслідок механізму турбулентного динамо [20–34]. Рухи плазми в астрофізичних умовах і, зокрема, у конвективній зоні Сонця, як було зазначено вище, зазвичай сильно турбулізовані. З огляду на це найбільшого поширення серед геліофізиків набула теорія динамо в турбулізованому електропровідному середовищі. Суть динамо-процесу полягає в підсиленні первісного слабкого магнітного поля рухами електропровідного турбулізованого середовища з позитивним зворотним зв'язком, які приводять до самопідтримки або подальшого зростання поля. Магнітні поля в умовах їх вмороженості у високопровідну плазму захоплюються гідродинамічними рухами і, розтягуючись і згинаючись, здобувають додаткову енергію. Тобто, турбулентні потоки електропровідної речовини діють подібно до **динамо-машини із самозбудженням** (принцип якої в лабораторних умовах був розроблений у 1866 знаменитим німецьким фізиком і винахідником Вернером фон Сіменсом), перетворюючи механічну енергію в магнітну енергію. Зауважимо, що динамо-теорія в астрофізичних умовах пов'язана з динамо-машиною тільки назвою і найзагальнішою ідеєю, оскільки в космічній плазмі відсутні ізолятори, тверді провідники, обмотки тощо. Цікаво, що теорія магнітного динамо, яка спочатку була задумана для пояснення постійності космічних магнітних полів, у випадку магнітного поля Сонця залучається для пояснення екстремально швидких (порівняно із характерними довготривалими космологічними проміжками часу) змін магнітного поля. Зазначимо, що динамо-механізми не в змозі пояснити, як виникли магнітні поля небесних тіл від самого початку. Вони пояснюють лише, як космічний магнетизм зберігається і підсилюється впродовж тривалого часу, незважаючи на постійне послаблення полів внаслідок омичного виснаження струмів, які їх породжують. Для здійснення динамо-процесу необхідна наявність за якихось причин хоча б невеликого "затравочного" магнітного поля або слабкого первісного струму.

Винятково плідним для теорії космічного динамо виявився двомасштабний підхід, суть якого полягає в поділі поля швидкостей і магнітного поля на усереднені (великомасштабні, із характерними розмірами порядку радіуса Сонця) і флуктуаційні (маломасштабні) розміри, і залученні до розгляду асиметрії маломасштабних рухів [20–22]. Саме в конвективній зоні, де поле гідродинамічних рухів природно поділене на два істотно відмінних масштаби: регулярні рухи (відповідають сонячному обертанню) і хаотичні (відповідають маломасштабній турбулентній конвекції), існують належні умови для турбулентної "динамо-машини" [24–27, 30]. Надзвичайно важливо, що внаслідок взаємодії обертання і конвекції тут створюється специфічна комбінація двох полів швидкостей різних масштабів: великомасштабного неоднорідного (диференційного) обертання і маломасштабної гіротропної (дзеркально-несиметричної) турбулізованої конвекції. Іншими словами, під впливом обертання турбулентна в'язкість стає анізотропною, тоді як анізотропія турбулентності викликає диференційне обертання

Особливих складнощів із пошуком механізму збудження тороїдального поля не було. Турбулентна в'язкість конвективних зон зір і Сонця під впливом обертання стає анізотропною, що приводить до їхнього диференційного обертання  $\Omega(r, \theta)$  ( $r$  – відстань від центра Сонця,  $\theta$  – полярний кут у сферичній системі координат) [35]. Піонерські дослідження в цьому напрямі ще в 1941 р. зробив О. Лебединський [36]. Однак його результат було незаслужено забуто, чи можливо не помічено під час війни. Згодом у 1951 р. цю ж ідею незалежно запропонував Л. Бірман [37]. Саме диференційне обертання  $\Omega(r, \theta)$  в умовах високопровідної плазми генерує тороїдальне поле  $\mathbf{V}_t$  із полоїдального  $\mathbf{V}_r$ . Уперше це показав В. Ельзассер у 1946 р. [38]. Каменем спотикання і найбільш важливою ланкою для дослідників тривалий час залишалася проблема зворотного зв'язку тороїдального поля з полоїдальним: як відтворити в наступному циклі полоїдальне поле, та ще й протилежного спрямування (протилежної полярності) щодо його орієнтації в попередньому циклі. Перший крок у напрямі розв'язання цієї проблеми зробив Ю. Паркер [23], який показав, що під дією коріолісової сили турбулізована конвекція в підфотосферних шарах стає циклонічною. Фізична концепція Паркера отримала математичне обґрунтування у роботах [22], присвячених вивченню електродинамічного впливу турбулентності на замагнічену плазму. Дослідження електромагнітних властивостей турбулентної плазми, розпочаті в 60-х рр. ХХ ст. під керівництвом фізика М. Штеєнбека (Йенський інститут магнітогідродинаміки) у співпраці з теоретиками-астрофізиками Ф. Краузе і К.-Х. Редлером (Потсдамський інститут астрофізики), привели до створення магнітогідродинаміки (МГД) для усереднених (великомасштабних) статистичних параметрів поля – так званої макроскопічної МГД [22].

Пояснимо детальніше основний **новий турбулентний ефект** макроскопічної МГД – виникнення спіральності в конвективній зоні Сонця, яка обертається [20]. Густина плазми в СКЗ зменшується (збільшується) при зміщенні по радіусу вгору (донизу) – згідно з моделями СКЗ густина речовини при переході від дна конвективної зони до

поверхні зменшується на 5–6 порядків величини. Конвективні комірки, що піднімаються (опускаються) з радіальною швидкістю  $u_r$ , входять у ділянки з меншою (більшою) густиною, де вони розширюються (стискаються) з тангенціальною швидкістю  $u_{tg}$ , щоб набути густини навколишньої плазми. Оскільки це відбувається на небесному тілі, що обертається, то на тангенціальні (горизонтальні) складові швидкості  $u_{tg}$  діє сила Коріоліса  $2[u_{tg}\Omega]$ , внаслідок якої конвективні комірки повертаються зі швидкістю  $u_{rot}$  навколо вертикальної осі – закручуються у протилежних напрямках для висхідних і низхідних потоків. Якщо взяти операцію  $rot$  від швидкості певного повороту  $u_{rot}$ , то отримуємо вектор  $rot\ u_{rot}$ , паралельний вертикальній осі. Нагадаємо, що основний рух комірки радіальний  $u_r$ , тобто також паралельний цій осі. З огляду на це повна швидкість  $u = u_r + u_{tg} + u_{rot}$  характеризується відмінною від нуля усередненою кореляцією  $\langle u \cdot rot\ u \rangle = \langle (u_r + u_{tg} + u_{rot}) \cdot rot\ (u_r + u_{tg} + u_{rot}) \rangle = \langle u_r \cdot rot\ u_{rot} \rangle \neq 0$ , що представляє собою добуток "спіну" вихору на його швидкість. Для отримання сумарного ефекту закручування певного знаку необхідна деяка асиметрія між висхідними і низхідними потоками. Головною причиною асиметрії на Сонці служить стратифікація, зумовлена тим, що висхідні комірки розширюються, а низхідні стискаються. Інші причини можуть бути пов'язані з топологією рухів (оскільки плазма піднімається переважно в центрі конвективної комірки й опускається на її краях) і магнітною плавучістю, що сприяє підйому намагніченої плазми. Результуюча комбінація радіального й обертального рухів приводить у досить протяжних ділянках до переважання в північній півсфері лівогвинтового, а в південній – правогвинтового закручування (гіротропності)  $\langle u \cdot rot\ u \rangle \neq 0$ . Таким чином, гіротропність (спіральність) є абсолютно природним ефектом, який із необхідністю виникає у гравітаційному полі в охопленні турбулентною конвекцією системах, що обертаються. Саме тому в усіх зорях, які мають конвективні зони, поле швидкостей турбулізованої конвекції завжди набуває спірального характеру. Зауважимо, що в земній атмосфері поле конвективних рухів також має спіральний характер.

За умови вмороженості магнітного поля у високопровідну плазму усереднена спіральна турбулентність збуджує електричне поле  $\epsilon = \alpha \langle \mathbf{B} \rangle / c$ , з яким пов'язаний електричний струм  $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{\epsilon}$ , необхідний для самопідтримання глобального магнетизму  $\langle \mathbf{B} \rangle$  ( $\alpha = -(\tau/3) \langle u \cdot rot\ u \rangle$  – параметр спіральності, що має розмірність швидкості,  $\tau$  – час кореляції турбулентних пульсацій,  $\sigma$  – коефіцієнт турбулентної електропровідності). Можливість появи індукованого електричного поля  $\epsilon = \alpha \langle \mathbf{B} \rangle / c$ , паралельного чи антипаралельного (залежно від знаку параметра  $\alpha$ ) до напряму усередненого магнітного поля  $\langle \mathbf{B} \rangle$  в середовищі, яке в середньому є нерухомим, але перебуває у стані турбулентних рухів, суперечить звичній картині у класичній електродинаміці, коли індуковане регулярними рухами зі швидкістю  $\mathbf{U}$  електричне поле  $(\mathbf{U} \times \mathbf{B})/c$  завжди є перпендикулярним до напряму магнітного поля  $\mathbf{B}$ . Параметр гвинтової (гіротропної) турбулентності  $\alpha$  був уведений М. Штесенбеком, Ф. Краузе і К.-Х. Редлером [22], які виникнення усередненого турбулентного електричного поля  $\epsilon$  назвали " $\alpha$ -ефектом". Незважаючи на свою довільність, цей термін досить міцно вкоренився, а сам  $\alpha$ -ефект відтоді є суттю усієї сучасної теорії турбулентного динамо. Хоча вперше із фізичних міркувань цей ефект виявив Паркер [23] й евристично ввів параметр **циклонічності**  $\Gamma$ , що майже збігається з уведеним пізніше параметром гіротропності  $\alpha$  [22]. Згодом Г. Моффат [39] запровадив термін **спіральна** (англ. *helical*) турбулентність, який нині став загальноживим. За досить інтенсивної спіральності  $\alpha$ -ефект збуджує магнітні поля, які можуть протистояти омичним виснаженням електричних струмів, відкриваючи тим самим прямиий шлях до пояснення походження космічного магнетизму.

Отже, під впливом глобального обертання (коріолісової сили) в умовах зумовленого гравітацією сильного вертикального градієнту густини плазми  $\nabla\rho$  турбулізовані конвективні рухи в підфотосферних шарах набувають анізотропного гіротропного (спірального) характеру, що описується параметром  $\alpha(r, \theta)$ , тоді як внаслідок анізотропії конвекції обертання стає неоднорідним (диференційним)  $\Omega(r, \theta)$  [20–22].

Диференційне обертання в умовах вмороженості магнітних полів у плазму, розтягуючи силові лінії полоїдального поля  $\mathbf{B}_r$ , генерує тороїдальну компоненту  $\mathbf{B}_t$ , так званий  $\Omega$ -ефект, який описується рівнянням

$$\partial \mathbf{B}_t / \partial t = r \sin\theta (\mathbf{B}_r \nabla) \Omega \mathbf{i}_\phi + v_T \Delta \mathbf{B}_t, \tag{2}$$

де  $\nabla \equiv \partial/\partial r$  – радіальний градієнт,  $\mathbf{i}_\phi$  – азимутальний одиничний вектор,  $v_T \approx (1/3)ul$  – коефіцієнт турбулентної в'язкості, яка викликає дисипацію (затухання) поля,  $u$  і  $l$  – ефективна швидкість і характерний масштаб турбулентних рухів. Разом із тим, усереднена спіральна турбулентність регенерує із цього поля  $\mathbf{B}_t$  нову полоїдальну компоненту  $\mathbf{B}_r$ , антипаралельного спрямування щодо його вихідної орієнтації ( $\alpha$ -ефект), замикаючи досить просто тим самим сонячний динамо-цикл. Регенерація полоїдального поля описується рівнянням

$$\partial \mathbf{A} / \partial t = \alpha \mathbf{B}_t + v_T \Delta \mathbf{A}, \tag{3}$$

де  $\mathbf{A} = A \mathbf{i}_\phi$  – тороїдальний векторний потенціал ( $\mathbf{B}_r = rot\ \mathbf{A}$ ). Механізм самопідтримання аксіально-симетричних тороїдального та полоїдального полів, у якому основну роль відіграють  $\alpha$ -ефект і  $\Omega$ -ефект отримав назву " $\alpha\Omega$ -динамо". Турбулентна в'язкість (магнітна дифузія)  $v_T$  відіграє подвійну роль в еволюції і перебудові магнітних полів: вона об'єднує всі маломасштабні петлі магнітного потоку в одне згладжене поле і, крім того, сприяє поширенню великомасштабного поля із ділянки його збудження по всій СКЗ. У випадку, коли генерація і турбулентна дисипація магнітних потоків зрівноважені, то отримуємо циклічну модель  $\alpha\Omega$ -динамо, що описується системою рівнянь (2)–(3). При розробці нелінійних динамо-моделей слід мати на увазі, що наростаюче із часом магнітне поле буде наперед впливати на спіральність поля швидкостей. Це зумовлено тим, що кінетична енергія маломасштабних рухів спіральної турбулізованої конвекції значно менша кінетичної енергії великомасштабного диференційного обертання, тому чутливий  $\alpha$ -ефект буде слабшим, ніж потужний  $\Omega$ -ефект.

Уперше гідромагнітну динамо-модель, основу на спільній дії циклонічної турбулентності і диференційного обертання, розглянув Ю. Паркер [23], який розв'язок рівнянь динамо (2)–(3) подав у вигляді динамо-хвиль, період яких зумовлює тривалість сонячного циклу. Після Паркера стало зрозуміло, що для підсилення магнітного поля і циклічних змін його величини та полярності особливо ефективною є комбінація неоднорідного обертання й асиметричного поля маломасштабного поля швидкостей (спіральної турбулізованої конвекції) [20, 21]. Однак цих двох ефектів недостатньо для побудови реалістичної моделі магнітного циклу Сонця. З огляду на це при побудові сценарію спостереженої карти-

ни магнітної циклічності необхідно доповнити модель  $\alpha\Omega$ -динамо новітніми ефектами турбулентної перебудови глобального магнетизму (макроскопічного турбулентного діамagnetизму [40], магнітної накачки в неоднорідному за густиною турбулентному середовищі [41]) і меридіональною циркуляцією (дет. див. нижче).

**Розподілена локалізація ефектів сонячного динамо.** Нині запропоновано численні моделі сонячного динамо, які складніші, ніж модель Паркера, однак у більшості своїй вони базуються на останній. Новизна моделей останніх років полягає в тому, що генерація полоїдальної і тороїдальної компонент аксіально-симетричного глобального магнітного поля відбувається неоднаково ефективно у всьому об'ємі СКЗ, як це вважалося раніше, а в її розподіленні ділянках.

Зокрема, найсприятливішими для регенерації полоїдальної компоненти служать шари СКЗ *поблизу сонячної поверхні*, де внаслідок  $\alpha$ -ефекту Беккока – Лейтона, який визначається кутами нахилу (англ. *tilt angle*) спостережених біполярних магнітних зон (утворених дугами спливаючих магнітних силових трубок тороїдального поля), турбулентною дифузєю і меридіональною циркуляцією, відбувається збудження нового полоїдального поля, протилежного спрямування щодо його орієнтації в попередньому циклі [30, 42, 43]. Як зазначалося вище, це дозволяє замкнути сонячний динамо-цикл. Водночас, з погляду амплітуди сонячного циклу надзвичайної актуальності набуває питання про локалізацію  $\Omega$ -ефекту, оскільки у присутності слабого полоїдального поля саме він збуджує потужне тороїдальне поле, від якого залежить інтенсивність плямоутворення (нагадаємо, що на Сонці індукційна дія диференційного обертання на кілька порядків сильніша збудження полів  $\alpha$ -ефектом). У зв'язку із цим дослідники останнім часом зосередили свою увагу на дослідженні глибинних шарів. У підсумку було знайдено переконливі докази, що саме поблизу дна СКЗ існують необхідні умови для ефективної генерації і тривалого утримання тороїдального поля. Зупинимось коротко на цих аргументах.

**Магнітна плавучість Паркера й ефекти "антиплавучості".** Для ефективної генерації тороїдального магнітного поля внаслідок дії диференційного обертання на полоїдальне поле необхідно, щоб магнітні силові трубки тривалий час перебували в ділянці генерації. Проте внаслідок магнітної плавучості Паркера важко забезпечити значне підсилення та зберігання сильних полів в усьому об'ємі СКЗ упродовж тривалого часу, порівняного з періодом сонячного циклу, що приводить до обмеження на амплітуду збуджуваного тороїдального поля. Обмеження зумовлено тим, що швидкість магнітного спливання  $U_B$  залежить від величини поля  $B$  і густини плазми  $\rho$  [44]

$$U_B(B, \rho) \approx B/(4\pi\rho)^{1/2}. \quad (4)$$

Із виразу (4) видно, що за заданого поля  $B$  швидкість спливання буде найменшою у глибоких шарах, де найбільша величина густини плазми. Разом із тим, навіть тут важко забезпечити значне підсилення полів і тривале утримання полів величиною понад 100 Гс упродовж часу, порівняного з періодом сонячного циклу, внаслідок швидкої евакуації сильних полів із зони генерації. Водночас моделювання процесів спливання магнітних трубок в СКЗ показало, що для пояснення спостережених в активних ділянках на сонячній поверхні величин магнітних полів необхідно, щоб поблизу дна СКЗ інтенсивність тороїдальних магнітних полів досягала, принаймні, значень порядку  $10^3$ – $10^4$  Гс. З огляду на це з особливою потребою на перший план виходить проблема компенсації магнітної плавучості таких сильних полів й утримання їх тривалий час у ділянці динамо. Іншими словами, виникає необхідність пошуку механізмів магнітної "антиплавучості" (негативної магнітної плавучості). Як виявилось, роль таких механізмів у гравітаційному полі можуть виконувати новітні турбулентні ефекти макроскопічної МГД: турбулентний діамagnetизм [40] і магнітна накачка в неоднорідному за густиною турбулентному середовищі, що обертається (ротаційний  $\nabla\rho$ -ефект) [41]. У зв'язку із цим важливого значення набувають глибинні шари (перехідна ділянка) між конвективною і променистою (радіативною) зонами, де характерні розміри турбулентних рухів зазнають кардинальної перебудови.

**Шар проникної конвекції (овершут).** Важливо пам'ятати, що в космічних умовах характерні розміри турбулентних вихорів зазвичай достатньо великі для того, щоб у більшості випадків між турбулізованими і незтурбуленими астрофізичними структурами чи об'єктами виникали ділянки поступового спадання інтенсивності турбулентності. Як зазначено вище, поле швидкостей в СКЗ природно розділене на два масштаби (маломасштабну спіральну турбулентну конвекцію та великомасштабне диференційне обертання). Характерні розміри цих двох полів швидкостей достатньо великі для того, щоб між СКЗ і радіативною зоною виникали ділянки поступового спадання амплітуд їхніх швидкостей. Тому біля дна СКЗ має сформуватися *два перехідних шари*, у яких відсутнє різке обривання поля швидкостей різних масштабів. **Перший шар** пов'язаний із турбулентною конвекцією, а **другий** – із диференційним обертанням. Слід очікувати, що перехідний шар між *маломасштабною* турбулентною конвекцією і променистою зоною *буде тоншим* порівняно з перехідним шаром від *великомасштабних* широтних варіацій кутової швидкості в СКЗ до майже однорідного обертання у променистих надрах.

Дійсно, оскільки біля дна СКЗ кореляційна довжина турбулентних рухів  $l$  за порядком величини становить значну частку вертикальної довжини зони конвекції, то поле швидкостей  $u$  турбулізованої конвекції буде по інерції проникати у стабільну щодо рухів радіативну зону (*перколяція турбулентності*), збільшуючи довжину зони механічного перемішування речовини, хоча в ній уже не виконується критерій Шварцшильда (1) виникнення конвективної нестійкості. Внаслідок такого просочування (проковзування) турбулентності нижче "активної" СКЗ формується перехідний шар своєрідної "пасивної конвекції" (оскільки тут несприятливі умови для її самозбудження) – тобто шар поступового зменшення інтенсивності пульсації плазми до нуля. У літературі цей шар, усередину якого енергія переноситься конвекцією, а зовні – виноситься радіацією, отримав назву *шару проникної (проковзаної) конвекції* (англ. *convective overshoot layer*) [2–6]. Згідно з оцінками на основі геліосейсмологічних даних [45] і модельних розрахунків на базі реальної фізичної стратифікації сонячних надр [46], товщина шару проникної конвекції становить  $\approx 3000$  –  $3500$  км. Шар проникної конвекції сприяє накопиченню великомасштабного магнітного поля Сонця біля дна СКЗ і витісненню його в радіативні шари [20, 21].

Процес витіснення поля коротко можна описати так: внаслідок вмороженості поля у плазму магнітні силові лінії будуть "закидатися" інерційними турбулентними пульсаціями згори донизу в шар проникної конвекції. Зважаючи на це, через деякий час магнітне поле з'явиться на верхній межі радіативної зони, де раніше його не було, і де сприятливі умови для його тривалого існування, оскільки тут турбулентні пульсації вже майже відсутні. Водночас у шарах вище

конвективного овершуту внаслідок процесу заплутування силових ліній інтенсивними турбулізованими рухами в зоні розвиненої конвекції і джоулевої омичної дисипації магнітне поле поступово зникатиме в СКЗ. Отже, перколяція турбулентності приводить на нижній межі СКЗ до магнітної адвекції – поле витісняється з конвективної зони і концентрується у відносно тонкому шарі з великим градієнтом магнітного поля на вершині стабільної радіативної зони. Саме таким чином проявляється на Сонці **макроскопічний турбулентний діамагнетизм** (відкритий акад. Я. Зельдовичем [47]), фізичний сенс якого полягає у витісненні однорідного в початковий момент магнітного поля із ділянок високотемпературної плазми з вихровими турбулентними рухами. Зауважимо, що спостережені на сонячній поверхні грануляційні рухи різних масштабів також є результатом проникнення конвекції у фотосферні шари (поверхневий конвективний овершут).

Діючи у глибинах СКЗ проти магнітної плавучості, макроскопічний турбулентний діамагнетизм відіграє роль негативної магнітної плавучості. Згідно з нашими розрахунками [27] для параметрів турбулентності ( $u, l$ ), узятих із моделі СКЗ [48], швидкість спрямованого вниз уздовж сонячного радіуса діамагнітного витіснення горизонтального поля у глибинних шарах в зоні проникної конвекції досягає значень  $U_{\mu} = -\nabla v_T/2 \approx 2 \cdot 10^3$  см/с, що істотно зменшує ефективність магнітного спливання полів. Оскільки швидкість магнітного спливання  $U_B(B, \rho) \approx B/(4\pi\rho)^{1/2}$  залежить від величини поля  $B$ , то з умови взаємної компенсації швидкостей магнітного спливання  $U_B$  і діамагнітного занурення  $U_{\mu}$  можна знайти значення горизонтального стаціонарного поля  $B_0 \approx U_{\mu}(4\pi\rho)^{1/2}$ , спливання якого буде повністю компенсовано макроскопічним турбулентним діамагнетизмом. Наші розрахунки показали, що внаслідок балансу зазначених двох ефектів у глибинах СКЗ формується магнітний шар завтовшки 40 тис. км з величиною заблокованого магнітного поля 2000–3000 Гс [27].

**Тахоклін (шар спадання швидкості диференційного обертання).** Незважаючи на привабливість шару проникної конвекції для перебудови магнетизму, він занадто тонкий і тому суттєво не впливає на збудження магнетизму, а тільки сприяє збереженню магнітних полів у зоні генерації. Збудження великомасштабного магнітного поля в такому тонкому шару породжує низку проблем [49]. Зважаючи на це, особливого значення для перебудови магнетизму набуває **другий перехідний шар** (товщиною  $\approx 30$  тис. км), який простягається глибше в надра Сонця – так званий **тахоклін** (англ. *tachocline*), у якому обертання стрімко змінюється від диференційного в СКЗ до майже жорсткого у променистій зоні [7]. Розглянемо коротко, у чому полягає суть явища. Згідно з геліосейсмічними вимірюваннями [50, 51] диференційне обертання проникає в радіативні надра, внаслідок чого на нижній межі СКЗ утворюється тонкий перехідний шар від *широтного диференційного* до *твердотільного (жорсткого)* обертання. Походження цього перехідного шару, імовірно, пов'язане з тим, що під СКЗ якийсь механізм перенесення кутового моменту (наприклад в'язке перенесення) ефективно усуває широтну неоднорідність обертання. Смуга різкого спадання кутової швидкості перебуває нижче СКЗ, подібно до того, як термокліни лежать нижче шару перемішаної води в океані. Зважаючи на це, по аналогії з океанічним термокліном перехідний шар спадання кутової швидкості Е. Шпігель і Ж.-П. Цан [7] у 1992 р. назвали **тахокліном** – тобто шаром стрімкого спадання швидкості диференційного обертання (англ. *tachocline*). Товщина його за геліосейсмологічними даними дорівнює  $\approx 30$  тис. км, хоча остаточно вона не встановлена [52]. Внаслідок різкого спадання кутової швидкості саме в тахокліні радіальний градієнт кутової швидкості досягає свого максимуму, чим створює тут найсприятливіші умови для збудження сильного тороїдального поля. Вагомою обставиною є також те, що у глибинному тахокліні виявляється найменшою ефективністю магнітної плавучості, оскільки в цьому районі густина плазми найбільша за об'ємом СКЗ.

Крім того, згідно з останніми геліосейсмологічними експериментами, тахоклін має ще одну надзвичайно важливу для моделей динамо властивість. Він складається з ділянок, що по-різному обертаються. У низькоширотній ділянці повільного обертання кутова швидкість зменшується із глибиною ( $\partial\Omega/\partial r > 0$ ), тоді як у високоширотних ділянках швидкого обертання вона, навпаки, зростає із глибиною ( $\partial\Omega/\partial r < 0$ ) [50]. Природний поділ тахокліну на домени із протилежними знаками радіального зсуву кутової швидкості має принципове значення для теоретичного пояснення північно-південної магнітної асиметрії Сонця, спостереженої під час переполюсування полярного поля в епохи максимумів циклів сонячних плям, оскільки парність гармонік глобального поля, що збуджується механізмом динамо, залежить від знаку  $\partial\Omega/\partial r$  [27].

**Меридіональна циркуляція.** Поширення динамо-хвиль не у змозі задовільно пояснити спостережену міграцію сонячних плям у "королівській зоні" від середніх широт до екватору. З огляду на це було запропоновано пояснення екваторіальної міграції плям внаслідок меридіональних течій [53–55]. На сонячній поверхні слабка великомасштабна меридіональна течія речовини спрямована від екватору до полюсів. Спочатку вона була виявлена шляхом відстеження рухів магнітних структур [56, 57] і прямими вимірами доплерівських зсувів у спектральних лініях [58]. У наступні роки геліосейсмічні вимірювання показали, що спрямовані до полюсів меридіональні течії діагностуються методами локальної геліосейсмології [59] всередину Сонця до глибин  $r \approx 0,85R$  ( $R$  – радіус Сонця) [60, 61]. Виходячи із закону збереження речовини, дослідники прийшли до висновку, що біля нижньої основи СКЗ має існувати меридіональна течія протилежного напрямку від полюсів до екватора. За такої умови речовина біля полюсів має опускатися вниз до тахокліну, тоді як біля екватору вона повинна підніматися із глибин на поверхню, щоб таким чином забезпечити замкнений цикл меридіональної циркуляції речовини [53, 62]. Внаслідок чисельного моделювання на основі геліосейсмологічних експериментів було продемонстровано, що меридіональна циркуляція охоплює всі шари СКЗ і навіть може проникати нижче тахокліну в радіативну зону [63–65].

**Конвективний овершут і тахоклін – найсприятливіше місце для генерації тороїдального магнітного поля.** Як було зазначено вище, з погляду амплітуди сонячного циклу надзвичайної актуальності набуває питання про локалізацію  $\Omega$ -ефекту, оскільки згенеровані ним тороїдальні поля при спливанні регулюють інтенсивність плямоутворення. З огляду на проведений вище аналіз найсприятливішим місцем для генерації тороїдального магнітного поля є глибинні шари поблизу дна СКЗ, що охоплюють шар проникної конвекції (овершут) і тахоклін. **В овершуті** під впливом процесів антиплавучості створюються необхідні умови для **формування шару тривалого утримання магнітних полів**, тоді як у **тахокліні** внаслідок різкого спадання кутової швидкості **ефективно генерується потужне**



**тороїдальне поле**, паркерівська плавучість якого із часом починає переважати ефекти антиплавучості, внаслідок чого воно виноситься на поверхню. Крім того, у глибинах СКЗ густина кінетичної енергії диференційного обертання значно перевищує густину магнітної енергії, що сприяє трансформації кінетичної енергії в магнітну. Важливим чинником глибинних шарів служить також спрямована до екватору меридіональна течія, яка в межах моделі гідромагнітного динамо забезпечує міграцію тороїдальних полів від високих широт до низьких.

Для пояснення спостережуваного явища подвійних максимумів циклу сонячних плям нами розроблено сценарій [33], що містить генерацію магнітного поля поблизу дна СКЗ і його наступне винесення із глибинних шарів на поверхню в "королівській зоні". У запропонованій схемі перебудови магнітного поля беруть участь п'ять МГД-процесів:  $\Omega$ -ефект поблизу тахокліну, магнітна плавучість, макроскопічний турбулентний діаманетизм, ротаційний  $\nabla\rho$ -ефект і меридіональна циркуляція. Згідно із цим сценарієм у **тахокліні** внаслідок різкого спадання кутової швидкості із полярної області ефективно генерується потужне тороїдальне поле. Разом із тим, у **шарі конвективного овершуту** внаслідок ефектів негативної магнітної плавучості це зростаюче поле може утримуватися тривалий час, набуваючи при цьому значень до 3000 Гс. У міру подальшого підсилення за рахунок  $\Omega$ -ефекту заблоковане поле із часом досягає величин, достатніх для того, щоб завдяки перевазі паркерівської магнітної плавучості над ефектами негативної магнітної плавучості розпочати свій підйом до поверхні Сонця і зрештою через деякий час з'являється у вигляді сонячних плям у ділянці "королівської зони". Встановлено, що перебудова магнетизму у високоширотних і приекваторіальному доменах СКЗ відбувається у відмінних режимах. У полярних доменах проти магнітної плавучості діють два ефекти антиплавучості, які тривалий час блокують магнітні поля в конвективному овершуті. Тоді як у нижній половині приекваторіального домену один із цих ефектів змінює свій знак на протилежний, допомагаючи таким чином плавучості транспортувати поля до поверхні. Вагомим чинником сценарію служить глибинна меридіональна циркуляція, що забезпечує перенесення заблокованих тороїдальних полів із полярних ділянок до низьких широт. Ключову роль у розробленому механізмі подвійних максимумів плям відіграють дві хвилі тороїдальних полів, які завдяки глибинній меридіональній циркуляції зсунуті одна відносно одної в часі на 1–2 роки і поширюються у приекваторіальному домені від нижньої основи СКЗ до сонячної поверхні.

**Висновок.** Первісним джерелом енергії активності Сонця служить його ядро, де під час термоядерних реакцій синтезу нових хімічних елементів виділяється енергія у вигляді тепла і потужного електромагнітного випромінювання, а також частинок нейтрино високих енергій. Радіативна (промениста) зона, що оточує ядро, не має власних джерел енергії, тому вона лише переносить енергію назовні внаслідок дифузії випромінювання. Ближче до поверхні (починаючи із глибин 0,7 сонячного радіусу) внаслідок різкого падіння температури і зумовленого цим зростання непрозорості газу промениста (теплова) енергія перетворюється в механічну енергію турбулентних конвективних рухів газу. Зважаючи на це, цю ділянку сонячних надр назвали конвективною зоною. Саме вона виконує роль полігону, відповідального за сонячну активність. У конвективній зоні енергія переноситься переважно самим газом і в такій формі доходить до видимої межі Сонця, де зрештою проявляється на фотосферному рівні у вигляді доступних для спостережень грануляційних рухів різних масштабів. Водночас тут частина енергії конвективних потоків знову перетворюється в колишню форму і вивільнюється в зовнішніх шарах атмосфери, що надає можливість спостерігати її у вигляді випромінювання. Разом із тим, внаслідок локалізованого в конвективній зоні гідромагнітного механізму динамо частина кінетичної енергії великомасштабного диференційного обертання й енергії маломасштабних спіральних турбулізованих конвективних рухів у ході сонячного циклу переходить у магнітну енергію, забезпечуючи при цьому циклічні зміни магнітної активності Сонця. У глибинних шарах конвективної зони поблизу ділянок проникної конвекції (овершуту) і тахокліну у присутності слабкого полярного поля створюються сприятливі умови для збудження потужного тороїдального поля, яке, спливаючи на поверхню, визначає інтенсивність плямоутворення. У тахокліні завдяки  $\Omega$ -ефекту генерується сильне тороїдальне поле, тоді як у конвективному овершуті завдяки ефектам антиплавучості воно утримується тривалий час, допоки завдяки подальшому його підсиленню не настане черга паркерівського спливання. Внаслідок залучення до розгляду п'яти МГД-процесів перебудови великомасштабного магнетизму нами був розроблений сценарій пояснення спостережуваного явища подвійних максимумів циклу сонячних плям.

#### Список використаних джерел

1. Гибсон Э. Спокойное Солнце / Э. Гибсон. – М., 1977.
2. Roxburgh I.W. Convection and solar structure / I.W. Roxburgh // *Astron. Astrophys.* – 1978. – Vol. 65. – P. 281–285.
3. Spiegel E.A. Magnetic activity and variations in solar luminosity / E.A. Spiegel, N.O. Weiss // *Nature.* – 1980. – Vol. 287. – P. 616–617.
4. Ballegoijen A.A. van. The overshoot layer at the base of the solar convective zone and the problem of magnetic flux storage / A.A. Ballegoijen van // *Astron. Astrophys.* – 1982. – Vol. 113. – P. 99–112.
5. Schmitt J.H.M.M. The overshoot region at the bottom of the solar convection zone / J.H.M.M. Schmitt, R. Rozner, H.U. Bohn // *Astrophys. Journ.* – 1984. – Vol. 282. – P. 316–329.
6. Solar Dynamics, Rotation, Convection and Overshoot / S. Hanasoge, M.S. Miesch, M. Roth et al. J. // *Space Science Reviews.* – 2015. – Vol. 196, No. 1–4. – P. 79–99.
7. Spiegel E.A. The solar tachocline / E.A. Spiegel, J.-P. Zahn // *Astron. Astrophys.* – 1992. – Vol. 265. – P. 106–114.
8. Bénard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide / H. Bénard // *Revue Générale des Sciences Pures Appliquées.* – 1900. – Vol. 11. – P. 1261–1271; P. 1309–1328.
9. Rayleigh Lord. On convective currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the under side / Lord Rayleigh // *Philosophical Magazine.* – 1916. – Vol. 32. – P. 529–546.
10. Reynolds O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels / O. Reynolds // *Philosophical Transactions of the Royal Society A.* – 1883. – Vol. 173. – P. 935–982.
11. Вандакуров Ю.В. Конвекция на Солнце и 11-летний цикл / Ю.В. Вандакуров. – М., 1976.
12. Priest E.R. Solar Magnetohydrodynamics / E.R. Priest. – Dordrecht ; Boston ; L., 1982.
13. Соловьев А.А. Диффузная теория солнечного магнитного цикла / А.А. Соловьев, Е.А. Киричек. – Элиста ; СПб., 2004.
14. Miesch M.S. Large-scale dynamics of the convection zone and tachocline / M.S. Miesch // *Living Rev. Solar Phys.* – 2005. – Vol. 2, No.1. – P. 1–139.
15. Филиппов Б.П. Эруптивные процессы на Солнце / Б.П. Филиппов. – М., 2007.
16. Schwarzschild K. Über das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre / K. Schwarzschild // *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Math.-phys. Klasse.* – 1906. – Vol. 195. – P. 41–53.
17. Воронцов С.В. // Гелиосейсмология / С.В. Воронцов, В.Н. Жарков // *Итоги науки и техники. Астрономия.* – М., 1988. – Т. 38. – С. 253–338.
18. Унзольд А. Физика звездных атмосфер / А. Унзольд. – М., 1949.

19. Hathaway D.H. The solar cycle / D.H. Hathaway // *Living Rev. Solar Phys.* – 2015. – Vol. 12, No. 4. – P. 1–87.
20. Вайнштейн С.И. Турбулентное динамо в астрофизике / С.И. Вайнштейн, Я.Б. Зельдович, А.А. Рuzмакин. – М., 1980.
21. Zeldovich Ya.B. Magnetic Fields in Astrophysics / Ya.B. Zeldovich, A.A. Ruzmaikin, D.D. Sokoloff. – N. Y., 1983.
22. Krause F. Mean Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory / F. Krause, K.-H. Rädler. – Oxford, 1980.
23. Parker E.N. Hydromagnetic dynamo models / E.N. Parker // *Astrophys. Journ.* – 1955. – Vol. 122. – P. 293–314.
24. Stix M. Theory of the solar cycle // *Solar Phys* / M. Stix. – 1981. – Vol. 74. – P. 79–101.
25. Krivodubskij V.N. Rotational anisotropy and magnetic quenching of gyrotropic turbulence in the solar convective zone / V.N. Krivodubskij // *Astron. Reports.* – 1998. – Vol. 42. – P. 122–126.
26. Krivodubskij V.N. The structure of the global solar magnetic field excited by the turbulent dynamo mechanism / V.N. Krivodubskij // *Astron. Reports.* – 2001. – Vol. 45. – P. 738–745.
27. Krivodubskij V.N. Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone / V.N. Krivodubskij // *Astron. Nachrichten.* – 2005. – Vol. 326, № 1. – P. 61–74.
28. Krivodubskij V.N. Dynamo parameters of the solar convection zone / V.N. Krivodubskij // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* – 2006. – Vol. 22, № 1. – P. 1–20.
29. Charbonneau P. Dynamo models of the solar cycle / P. Charbonneau // *Living Rev. Solar Phys.* – 2010. – Vol. 7, № 3. – P. 1–91.
30. Kitchatinov L.L. The solar dynamo: Inferences from observations and modeling / L.L. Kitchatinov // *Geomagnetism. Aeronomy.* – 2014. – Vol. 54. – P. 867–876.
31. Krivodubskij V.N. Turbulent effects of sunspot magnetic field reconstruction / V.N. Krivodubskij // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* – 2012. – Vol. 28, № 5. – P. 232–238.
32. Krivodubskij V.N. Small scale alpha-squared effect in the solar convection zone / V.N. Krivodubskij // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* – 2015. – Vol. 31, № 2. – P. 55–64.
33. Krivodubskij V.N. Double maxima of 11-year solar cycles / V.N. Krivodubskij // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* – 2017. – Vol. 33, No. 1. – P. 24–38.
34. Simulation the generation of the solar toroidal magnetic field by differential rotation / A.A. Loginov, V. N. Krivodubskij, N.N. Salnikov, Yu.V. Prutsko // *Kinematics Phys. Celestial Bodies.* – 2017. – Vol. 33, № 6. – P. 265–275.
35. Tassoul J.-L. Theory of Rotating Stars / J.-L. Tassoul. – Princeton ; New Jersey, 1978.
36. Лебединский А.И. Вращение Солнца / А.И. Лебединский // *Астрон. журнал.* – 1941. – Т. 18, № 1. – С. 10–25.
37. Biermann L. Bemerkungen über das Rotationsgesetz in irdischen und stellaren Instabilitätszonen / L. Biermann // *Zeits. Astrophys.* – 1951. – B. 28. – S. 304–309.
38. Elsasser W.M. Induction effects in terrestrial magnetism / W.M. Elsasser // *Phys. Rev.* – 1946. – Vol. 69. – P. 106–116.
39. Moffat H.K. Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids / H.K. Moffat. – L. ; N. Y. ; Melbourne, 1978.
40. Krivodubskij V.N. Magnetic field transfer in the turbulent solar envelope / V.N. Krivodubskij // *Soviet Astronomy.* – 1984. – Vol. 28, № 2. – P. 205–211.
41. Krivodubskij V.N. Transfer of the large-scale solar magnetic field by inhomogeneity of the material density in the convective zone // *Soviet Astronomy Lett* / V.N. Krivodubskij. – 1987. – Vol. 13. – P. 338–341.
42. Криводубський В.Н. Роль альфа-ефекту Бейкока-Лейтона в генерації полярного магнітного поля Сонця / В.Н. Криводубський // *Вісник астрономічної школи.* – 2016. – Т. 12, № 1–2. – С. 153–165.
43. Криводубський В. Альфа-ефект Бейкока-Лейтона у поверхневих шарах Сонця / В. Криводубський // *Вісник Київ. нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. Астрономія.* – 2017. – № 1 (55). – С. 22–29.
44. Parker E.N. The formation of sunspots from the solar toroidal field / E.N. Parker // *Astrophys. Journ.* – 1955. – Vol. 121. – P. 491–507.
45. Basu S. Seismology of the base of the solar convection zone / S. Basu // *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* – 1997. – Vol. 288. – P. 572–584.
46. Marik D. A new model for the lower overshoot layer in the Sun / D. Marik, K. Petrovay // *Astron. Astrophys.* – 2002. – Vol. 396. – P. 1011–1014.
47. Зельдович Я.Б. Магнитное поле при двумерном движении проводящей жидкости / Я.Б. Зельдович // *ЖЭТФ.* – 1956. – Т. 31. – С. 154–156.
48. Stix M. The Sun: an introduction, second edition / M. Stix. – Berlin, 2002.
49. Rudiger G. A solar dynamo in the overshoot layer: cycle period and butterfly diagram / G. Rudiger, A. Brabdenburg // *Astron. Astrophys.* – 1995. – Vol. 296. – P. 557–566.
50. Howe R. Dynamic variations at the base of the solar convection zone / R. Howe, J. Christensen-Dalsgaard, F. Hill et al. // *Science.* – 2000. – Vol. 287. – P. 2456–2460.
51. Helioseismic constraints on the structure of solar tachocline / P. Charbonneau, J. Christensen-Dalsgaard, R. Henning et al. // *Astrophys. Journ.* – 1999. – Vol. 527. – P. 445–460.
52. Kosovichev A.G. Helioseismic constraints on the gradient of angular velocity at the base of the solar convection zone / A.G. Kosovichev // *Astrophys. Journ.* – 1996. – Vol. 469. – P. L61–L64.
53. Nandy D. Explaining the latitudinal distribution of sunspots with deep meridional flow / D. Nandy, A.R. Choudhuri // *Science.* – 2002. – Vol. 296. – P. 1671–1674.
54. Wang Y.-M. A new solar cycle model including meridional circulation / Y.-M. Wang, N.R. Sheeley Jr., A.G. Nash // *Astrophys. Journ.* – 1991. – Vol. 383. – P. 431–442.
55. Choudhuri A.R. The solar dynamo with meridional circulation / A.R. Choudhuri, M. Schussler, M. Dikpati // *Astron. Astrophys.* – 1995. – Vol. 303. – P. L29.
56. Komm R.W. Meridional flow of small photospheric magnetic features / R.W. Komm, R.F. Howard, J.W. Harvey // *Solar Phys.* – 1993. – Vol. 147. – P. 207–223.
57. Snodgrass H.B., Dailey S.B. Meridional motions of magnetic features in the solar photosphere / H.B. Snodgrass, S.B. Dailey // *Solar Phys.* – 1996. – Vol. 163. – P. 21–42.
58. Hathaway D.H. Doppler measurements of the Sun's meridional flow / D.H. Hathaway // *Astrophys. Journ.* – 1996. – Vol. 460. – P. 1027–1033.
59. Gizon L. Local helioseismology / L. Gizon, A.C. Birch // *Living Rev. Solar Phys.* – 2005. – Vol. 2, № 6. – P. 1–75.
60. Giles P.M. A subphotospheric flow of material from the Sun's equator to its poles / P.M. Giles, T.L. Duval Jr., P.H. Scherrer, R.S. Bogart // *Nature (London).* – 1997. – Vol. 390. – P. 52–54.
61. Braun D.C. Prospects for the detection of the deep solar meridional circulation / D.C. Braun, A.C. Birc // *Astrophys. Journ. Lett.* – 2008. – Vol. 689. – P. L161–L165.
62. Hazra G. Is a deep one-cell meridional circulation essential for the flux transport solar dynamo? / G. Hazra, B.B. Karak, A.R. Choudhuri // *Astrophys. Journ.* – 2014. – Vol. 782, № 2. – P. 93–104.
63. Hathaway D.H. Supergranules as probes of the Sun's meridional circulation / D.H. Hathaway // *Astrophys. Journ.* – 2012. – Vol. 760. – P. 83–89.
64. Howe R. Solar interior rotation and its variation / R. Howe // *Living Rev. Solar Phys.* – 2009. – Vol. 6, No. 1. – P. 1–75.
65. Jackiewicz J. Meridional flow in the solar convection zone. II. Helioseismic inversions of GONG DATA / J. Jackiewicz, A. Serebryanskiy, S. Kholikov // *Astrophys. Journ.* – 2015. – Vol. 805, № 2. – P. 133–141.

Надійшла до редколегії 02.05.18

В. Криводубський, д-р физ.-мат. наук  
 Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев

## РОЛЬ КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЫ В ВОЗБУЖДЕНИИ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

Проанализированы источники энергии солнечной активности. Первичным источником солнечной энергии служит ядро Солнца, где в результате реакций термоядерного синтеза выделяется энергия в форме  $\gamma$ -квантов и частиц нейтрино, которые распространяются вовне наружу. При приближении к поверхности стремительно падает температура и одновременно растёт непрозрачность

вещества лучистой зоны, в результате чего на расстоянии около 0,3 радиуса Солнца от его поверхности возникают условия для возбуждения конвективного переноса энергии. Выше этой границы лежит слой, который называют конвективной зоной. Существование и локализация конвективной зоны Солнца определяется двумя причинами: первая – структурный (лучистый) градиент температуры увеличивается из-за роста непрозрачности при падении температуры; вторая – адиабатический градиент температуры всплывающих элементов уменьшает свою величину в зонах частичной ионизации водорода и гелия.

Именно конвективная зона играет роль полигона, где зарождаются основные процессы, ответственные за циклические проявления активности Солнца. Вместе с тем, часть конвективного потока энергии, которая идет из недр Солнца, накапливается и переносится наружу в "магнитной форме". Специфичность магнитного переноса энергии проявляется в циклических изменениях большинства порождаемых магнитными полями явлений, которые принято называть магнитной активностью Солнца. Основным механизмом, который обеспечивает циклический характер колебаний магнитной активности, служит турбулентное динамо, локализованное в конвективной зоне.

Наиболее благоприятным местом для генерации тороидального магнитного поля, от величины которого зависит интенсивность пятнообразования, служат глубокие слои вблизи дна конвективной зоны, охватывающие слой проникающей конвекции (конвективный овершут) и тахоклин. В овершуте возникают необходимые условия для формирования слоя длительного удержания магнитных полей, тогда как в тахоклине вследствие резкого падения угловой скорости в присутствии слабого полоидального поля эффективно генерируется сильное тороидальное поле. Паркерова плаучность этого поля со временем доминирует над эффектами антиплаучности. Поэтому в конечном итоге тороидальное поле поднимается к поверхности и формирует тем самым магнитные биполярные группы солнечных пятен. Важным фактором физических процессов в глубинных слоях является также направленное к экватору меридиональное течение, которое в рамках модели гидромагнитного динамо обеспечивает миграцию тороидальных полей от высоких гелиоширот к низким. Отмечены последние исследования автора о роли глубинных слоев солнечной конвективной зоны в объяснении наблюдаемых явлений двойных максимумов цикла солнечных пятен.

Ключевые слова: Солнце, термоядерный синтез, излучение, конвекция, магнитная энергия, солнечная активность, овершут, тахоклин, магнитная плаучность, меридиональная циркуляция, турбулентное динамо, магнитный цикл.

V. Krivodubskij, Dr. Sci.

Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

### THE ROLE OF THE CONVECTIVE ZONE IN THE EXCITATION OF THE MAGNETIC ACTIVITY OF THE SUN

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  $\gamma$ -quanta and neutrino particles that propagate outward. As approaching the surface, the temperature is rapidly decreasing and at the same time the opacity of the radiation zone steadily increases, resulting in the creation of conditions for the emergence of a convective energy transfer at a distance from surface of about 0.3 radius of the Sun. Above this boundary lies a layer called the convection zone. The existence and localization of the convection zone of the Sun is determined by two reasons: the first – the structural (radiative) temperature gradient increases due to increased opacity when the temperature drops; the second – the adiabatic gradient of the temperature of the floating elements reduces its value in the zones of partial ionization of hydrogen and helium.

It is the convection zone that plays the role of the landfill, where the main processes are born, which are responsible for the cyclic manifestations of the Sun's activity. However, part of the convective flow of energy coming from the interior of the Sun, accumulates and is carried upwards in the "magnetic form". An important specific property of magnetic energy transfer is manifested in cyclic changes in most of the phenomena generated by magnetic fields, which are called magnetic activity of the Sun. The main mechanism providing the cyclic nature of the fluctuations of magnetic activity is the turbulent dynamo, localized in the convection zone.

The most favorable place for the generation of a toroidal magnetic field, on which the intensity of spot formation depends, are the deep layers near the bottom of the convection zone, covering the layer of permeable convection (convective overshoot layer) and the tachocline. Overshoot creates the necessary conditions for the formation of a layer of long retention maintenance of magnetic fields, whereas in the tachocline, due to the sharp decrease in angular velocity in the presence of a weak poloidal field, a powerful toroidal field is effectively generated. Parker buoyancy of this field dominates over the effects of anti-buoyancy. Therefore, eventually, toroidal field rises to the surface and forms magnetic bipolar groups of sunspots. An important factor of physical processes in the deep layers is also the meridional flow directed to the equator, which, within the framework of the hydromagnetic dynamo model, provides the migration of toroidal fields from high latitudes to low ones. The author's recent studies on the role of the deep layers of the solar convection zone in explaining the observed phenomenon of double peaks of the cycle of sunspots are noted.

Keywords: Sun; excitation of solar energy; radiation; convection; magnetic energy; convective zone; solar activity; overshoot layer; tachocline; magnetic buoyancy; meridional circulation; turbulent dynamo; magnetic cycle.

УДК 524.7

С. Парновський, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

І. Ізотова, канд. фіз.-мат. наук

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

### КОМПАКТНІ ГАЛАКТИКИ З АКТИВНИМ ЗОРЕУТВОРЕННЯМ: ТЕПЛОВЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ У РАДІОКОНТИНУУМІ НА ЧАСТОТІ 1.4 ГГц

Визначено частку теплового компонента в загальному випромінюванні в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц від 193 компактних галактик з активним зореутворенням. Розподіл цієї величини є близьким до лог-нормального з медіаною між 6% та 14%. Частка зростає за збільшення  $EW(H_{\beta})$  еквівалентної ширини емісійної лінії  $H_{\beta}$  при постійному індексу кольору  $g-r$ , або збільшенні індексу кольору  $g-r$  при постійній  $EW(H_{\beta})$ , еквівалентній ширині емісійної лінії  $H_{\beta}$ . Знайдено залежність від обох параметрів одночасно. При збільшенні віку спалаху зореутворення частка теплового випромінювання зменшується. Не виявлено статистично значущої залежності від вмісту важких елементів.

Ключові слова: галактики з активним зореутворенням, випромінювання в радіоконтинуумі, теплове випромінювання.

**Вступ.** Зореутворення є одним із найважливіших процесів у галактиці, що впливає на її еволюцію та визначає хімічний склад. Зважаючи на це, дослідженню галактик, у яких цей процес перебігає активно, присвячено багато праць. Проведено значну кількість досліджень випромінювання галактик з активним зореутворенням у різних діапазонах (від ультрафіолетового до радіо), які є індикаторами цього процесу; проаналізовано історію зореутворення та визначено характеристики, параметри й особливості цього процесу у галактик різних типів та на різних червоних зміщеннях (див., напр., огляд [6], роботи [1, 9, 12–15, 18–20, 22–26, 28, 30, 32–34, 36–37, 40–41, 43–44, 48]).

Одним з індикаторів процесу зореутворення в галактиках є випромінювання в радіоконтинуумі на частоті 1.4 ГГц. Випромінювання в радіоконтинуумі на частотах, менших від кількох гігагерц, зазвичай має нетеплове походження,