

УДК 523.98

В. Криводубський, д-р фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб.
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

МАКРОСКОПІЧНІ СТРУКТУРИ В ПРИРОДІ І НА СОНЦІ

Зроблено огляд явищ самоорганізації в природі, зумовлених негативною турбулентною в'язкістю плазми. Проаналізовано роль маломасштабного α^2 -ефекту Крейчнана в утворенні дискретних магнітних полів у сонячній конвективній зоні (СКЗ). Останній ефект викликає зменшення сумарного коефіцієнта турбулентної магнітної дифузії. Проведені нами розрахунки для двох моделей СКЗ показали, що в глибинних шарах величина негативного коефіцієнта спіральної турбулентної дифузії векторного магнітного поля сягає близько двох третіх величини позитивного коефіцієнта турбулентної дифузії скалярного поля. Це повинно значною мірою сприяти самоорганізації первісно слабких неперервних магнітних полів в тонкі ізольовані магнітні силові трубки.

Ключові слова: макроскопічні структури, Сонце.

Вступ. Спостереження засвідчують дивну властивість поверхневих магнітних полів на Сонці, які мають тенденцію проявлятися у вигляді широко рознесених дискретних магнітних силових трубок (МСТ) однакової полярності. Необхідно зрозуміти, як можуть виникати на Сонці уніполярні магнітні структури незважаючи на взаємне відштовхування полів однієї полярності. Виходячи з енергетичних міркувань, здається очевидним, що процеси первинного формування МСТ повинні зароджуватися внаслідок гідродинамічних рухів в глибинних шарах СКЗ, оскільки тут густина кінетичної енергії рухів значно перевищує густина магнітної енергії. Загальноприйнято вважати, що спостережувані на сонячній поверхні ізольовані МСТ є результатом магнітного спливання з сонячних глибин на поверхню сильних полів. Тому необхідно дослідити фізичні процеси в глибоких сонячних шарах, що приводять до дискретної структури магнітних полів на Сонці. У нашій недавній роботі [16] було показано, що істотну роль у забезпеченні тривалої стабільності рівноважного стану вертикальних МСТ, що спливали на сонячну поверхню, відіграє ефект макроскопічного турбулентного діамagnetизму, відкритий академіком Зельдовичем Я.Б. [2]. Однак залишається не до кінця з'ясованим питання про причини початкової стадії фрагментації (концентрації) магнітного поля в ізольовані МСТ. Ми вважаємо, що важливу роль у вирішенні цього питання може справити ефект негативною турбулентною в'язкістю [22], прояви якого в природних умовах вперше було виявлено в атмосферах Землі і Сонця, а також в океанських течіях. У зв'язку з цим нами зроблено огляд явищ самоорганізації явищ в природі, зумовлених негативною турбулентною в'язкістю плазми. Далі ми проаналізували роль негативною турбулентною дифузії в формуванні дискретних магнітних полів у глибоких шарах Сонця.

Турбулентна дифузія скалярного і векторного полів. Спостережувані рухи на сонячній поверхні і конвекція в підфотосферній шарі з характерною швидкістю u відповідають ознакам розвиненої турбулентності в широкому інтервалі просторових l і часових τ масштабів, водночас спостережувані магнітні поля володіють просторовими і часовими характеристиками в широкому діапазоні від маломасштабних до великомасштабних структур. При вивченні великомасштабних магнітних структур, для яких характерні просторові L і часові T параметри, що значно перевершують відповідні параметри (l і τ) маломасштабної турбулентності, широкого поширення набула макроскопічна магнітогідродинаміка (МГД) [15]. Макроскопічна МГД базується на двохмасштабному підході до досліджуваних фізичних параметрах і рівняннях МГД і вивчає поведінку усереднених фізичних параметрів. Операція усереднення фізичних величин (для позначення якої використовуються кутові дужки $\langle \dots \rangle$) ведеться за проміжними просторовими a або часовими t масштабами, що перевищують характерні розміри l або час кореляції τ маломасштабних турбулентних пульсацій, але значно менші глобальних просторових L і часових T масштабів досліджуваного об'єкта ($L \gg a \gg l$, $T \gg t \gg \tau$). Головний ефект усередненого турбулентного електропровідного середовища в присутності глобального магнітного поля \mathbf{V} полягає у збудженні спіральними турбулентними рухами $\langle \mathbf{u} \cdot \text{rot } \mathbf{u} \rangle$ додаткового електричного поля $\boldsymbol{\varepsilon} = \alpha \langle \mathbf{V} \rangle$, т.з. α -ефект. Спіральність є абсолютно природним явищем, яке з необхідністю виникає під впливом сили Коріоліса $2[\mathbf{u} \cdot \boldsymbol{\Omega}]$ ($\boldsymbol{\Omega}$ – кутова швидкість) у гравітаційному полі в охоплених турбулентністю ротаційних системах [1]. Саме α -ефект, інтенсивність якого описується параметром спіральності $\alpha \approx -(\tau/3) \langle \mathbf{u} \cdot \text{rot } \mathbf{u} \rangle$, відкриває прямий шлях до збудження космічних магнітних полів. Рівняння великомасштабного динамо поряд з α -ефектом містять члени, які описують макроскопічний турбулентний діамagnetизм, що відповідає за просторове перенесення магнітного поля, а також ефект турбулентної дифузії, відповідальний за загасання магнітного поля.

Загальновідомо, що турбулентна в'язкість описує перенесення речовини в просторі, зумовлене турбулентними рухами середовища. Під дією турбулентного поля швидкостей u частинки скалярного поля речовини, наприклад, домішка диму, з часом розсіюються (дифундують) по простору. Дослідження турбулентної дифузії скалярного поля зазвичай ведеться в рамках теорії довжини шляху змішування Прандтля. Внаслідок високої електричної провідності, характерної для астрофізичних умов, космічні магнітні поля завжди виявляються в заморожених в турбулентне середовище і тому схильні до таких же пульсацій, як і речовина. Тому магнітне поле, подібно до турбулентної дифузії речовини, з часом також розсіюється (дифундує) по простору, тобто, схильне до турбулентної магнітної дифузії. За аналогією з турбулентною дифузійною скалярного поля дослідження турбулентної дифузії векторної величини – індукції магнітного поля – зазвичай також ведеться в рамках теорії довжини шляху змішування. У разі сильно турбулізованій рідині коефіцієнт турбулентної дифузії векторного магнітного поля збігається з коефіцієнтом дифузії скалярного поля. Враховуючи широкий діапазон характеристик поля швидкостей в СКЗ ми вважаємо, що для пояснення дискретної структури магнітних полів на Сонці можна залучити методи макроскопічної МГД.

Впродовж тривалого часу у дослідників побутовало породжене спостереженнями переконання, що турбулентність в природних середовищах завжди руйнує структури всіх видів. Проте з часом наступило розуміння, що маломасштабна турбулентність може формувати макроскопічні структури [11]. Було показано, що за певних умов в турбулентній рідині енстрофія – квадрат вихору швидкості $(\text{rot } \mathbf{u})^2$ – переноситься вздовж просторового спектра турбулентності від великомасштабних до дрібномасштабних рухів, тоді як енергія турбулентних швидкостей – величина,

пропорційна квадрату швидкості (u^2) – може переноситися в протилежному напрямку від малих масштабів до великих. Саме останній процес приводить до появи енергоємних макромасштабних вихрових структур. У науковій літературі цей феномен отримав назву зворотного (інверсного) каскаду енергії турбулентних рухів (див., наприклад, монографію [3]). Важливий прогрес в поясненні утворення макроскопічних структур в турбулентному середовищі був пов'язаний із залученням до розгляду спіральних ($\mathbf{u} \cdot \text{rot } \mathbf{u}$) рухів рідини. Виявилось, що виникненню інверсного енергетичного каскаду в тривимірній турбулентності сприяє швидке обертання систем, в яких розвиваються спіральні рухи (циклонічне обертання). В спіральній турбулентності підвищується стійкість і збільшується час життя турбулентних вихрових структур [18], тому усереднена спіральність породжує тенденцію до злиття дрібних вихорів [13, 14]. Цей процес відповідає властивостям *негативною в'язкості*, суть якої полягає в підтримці або навіть зростанні різниці швидкостей турбулентної течії [21].

Спіральна негативна в'язкість і самоорганізація макроскопічних структур в природі. Оскільки спіральність – абсолютно природна властивість турбулентності в ротаційних системах в полі гравітації, то в природі досить часто повинні зустрічатися випадки явищ негативної в'язкості. З явищами самоорганізації, негативної турбулентної в'язкості і інверсного енергетичного каскаду спіральності дослідники стикаються при вивченні багатьох навколишніх природних течій рідини в різноманітних системах, що відрізняються як складом і фізичною структурою середовища, так і фізичними процесами в них [19]. В рамках цієї концепції перехід від ламінарного течії до турбулентної розглядається як перехід до надзвичайно складного, але більш впорядкованого руху, іншими словами, як нерівноважний фазовий перехід до системи, яка самоорганізується [8]. На сьогодні відомо кілька сценаріїв можливих механізмів виникнення турбулентності після втрати стійкості ламінарною течією, а саме: механізм Ландау-Хопфа, пов'язаний з виникненням квазіперіодичних режимів з несумірними частотами і випадковими фазами; механізм Рюеля-Такеенса, пов'язаний з виникненням т.з. дивних атракторів після триразової біфуркації (суцільний стохастичний спектр); послідовність Файснґбаума, пов'язана з подвоєнням періодів і в кінцевому рахунку з появою дивного атрактора після нескінченного числа біфуркацій; і, нарешті, механізм перемежованості – послідовної зміни в часі ламінарної і турбулентної течій. Детальне обговорення різних сценаріїв виникнення турбулентності див. в монографії Ладікова-Роева Ю.П. і Черемниха О.К. [6].

Статистичні ефекти аномальної (негативної) в'язкості були виявлені раніше за все в атмосфері Землі (смерчі, тайфуни, торнадо, тропічні циклони, пасати і антипасати, циклони й антициклони, диференційне обертання земної атмосфери) і в поведінці земного океану (виникнення поверхневих хвиль, що призводять до теплих течій типу Гольфстрім, Ель-Ніньо, чорна Японська течія (Куросіо) і до холодної течії Ла-Ніньо). Важлива роль ефектів негативної в'язкості і спіральності була встановлена також у процесі самоорганізації в атмосфері і конвективних шарах Сонця (формування комірок Бенара і збудження диференційного обертання, сонячні плями і біполярні групи плям, активні області та комплекси активності, магнітовихрові кільця в корональних викидах маси і сонячному вітрі). Потім виявилось, що відзначені ефекти зіграли істотну роль у виникненні і еволюції Сонячної системи, зокрема, при виникненні планетних кілець. Пізніше була доведена важливість цих ефектів при дослідженні диференційного обертання атмосфер Юпітера, Сатурна і Венери (зокрема, смугастої структури в атмосферах великих планет), зірок, галактик і систем крупніших галактик. Можливість реалізації інверсного каскаду кінетичної енергії в космічних об'єктах з тривимірною спіральною турбулентністю, що приводить до появи негативної турбулентної в'язкості, була продемонстрована на прикладі реконструкції еволюції турбулентності протопланетного сонячного хмари і інших астрофізичних об'єктів [12].

Роль спіральних турбулентних структур у збудженні негативної турбулентної в'язкості в СКЗ. Принциповий ефект взаємодії турбулентності з магнітним полем полягає в тому, що турбулентність не обов'язково призводить до згладжування магнітних неоднорідностей. Навпаки, у разі вже згаданого спірального характеру рухів вона може створювати магнітні неоднорідності. В результаті числового моделювання Крейчнан Р. [13, 14] показав, що у випадку сильного завихрення турбулентної високопровідної рідини, яка знаходиться в неоднорідному великомасштабному магнітному полі, виникає ефект *спіральної негативною турбулентної магнітної дифузії*. Ключовим параметром нового явища служить час існування τ_2 усереднених спіральних вихорів ($\mathbf{u} \cdot \text{rot } \mathbf{u}$) (тут і далі ми використовуємо позначення характерних часів різних турбулентних структур відповідно до статей Крейчнана Р. [13, 14]). Дуже важливим при моделюванні було те, щоб окремі вихори з сильною власною спіральністю існували протягом часу τ_2 , більшого характерного часу життя $\tau_1 \approx l/u$ самих комірок. Крейчнану Р. вдалося показати відмінність від нуля усередненої величини квадрата параметра спіральності $\langle \alpha^2 \rangle$. До чого це може привести? Якщо виконується умова $\langle \alpha^2 \rangle \neq 0$ впродовж тривалого часу, то стійка турбулентна спіральність має *дивовижну еластичність "стягувати" присутні магнітні поля, а не розсіювати їх*. Крейчнан Р. [13, 14] назвав це явище *маломасштабним α^2 -ефектом*. Воно нагадує маломасштабне магнітне динамо в тому сенсі, що збільшує енергію і впорядковує магнітне поле – *самоорганізація замагніченої турбулентної плазми*. Для нестійкого зростання локального магнітного поля необхідно, щоб час підтримки τ_2 стійкої спіральності турбулентних пульсацій в два-три рази перевищував час кореляції τ_1 турбулентного поля швидкостей u . Це означає, що зміни спіральності мають бути повільними у порівнянні з кореляційним часом існування комірок τ_1 . Іншими словами, кожен вихор повинен володіти сильною власною спіральністю впродовж тривалого часу τ_2 , щоб за час підтримки спіральності рідини в замагніченій комірці встигла описати великий кут повороту Φ (хоча б $\Phi \sim \pi$). Для опису характерного часу циркуляції речовини в конвективних комірках Крейчнан Р. використовував позначення τ_0 , яке у конкретних фізичних умовах може бути більшим, рівним або меншим часу існування τ_1 самої комірки. Крейчнан Р. проводив дослідження при помірних і великих числах Рейнольдса, коли виконується умова $\tau_1 \approx \tau_0$ (тобто, за час існування комірки циркуляція речовини в ній робить повний оберт). Оскільки згідно з нашими розрахунками [4] числа Рейнольдса в СКЗ досягають великих значень (порядку 10^{13}), ми вважаємо правомірним застосувати результати експериментів Крейчнана Р. (що відповідають умовам $\tau_2 > \tau_1$, $\tau_1 \approx \tau_0$) для вивчення турбулентних процесів на Сонці. Отже, негативний коефіцієнт турбулентної магнітної дифузії можна в принципі отримати, якщо спеціально задати досить великий час підтримки стійких спіральних флуктуацій. Турбулентність в СКЗ в присутності магнітного поля можуть мати різні режими, разом з тим вони володіють помітною впорядкованістю, при якій для турбулентних пульсацій характерна істотна ієрархія масштабів, швидкостей і кореляційних часів [10]. Це дозволяє сподіватися, що вдасться підшукати прийнятний варіант параметрів турбулентної конвекції, при якому в сонячних шарах може проявитися негативна турбулентна магнітна дифузія.

Згідно з останнім нашим дослідженням [5] еволюція в часі усередненого магнітного поля внаслідок турбулентних процесів описується ефективним коефіцієнтом турбулентної магнітної дифузії

$$\eta_T^* = \eta_T + \eta_T^\alpha \approx (1/3) \tau_1 u^2 - \tau_2 \langle \alpha^2 \rangle,$$

де $\eta_T \approx (1/3) u l \approx (1/3) \tau_1 u^2$ і $\eta_T^\alpha \approx -\tau_2 \langle \alpha^2 \rangle$ відповідно коефіцієнт турбулентної дифузії скалярного поля і коефіцієнт негативної турбулентної магнітної дифузії векторного магнітного поля, зумовленої спіральністю турбулентних вихорів, $\alpha \approx -(\tau_1/3) \langle \mathbf{u} \cdot \text{rot } \mathbf{u} \rangle$ – параметр гідродинамічної спіральності [1]. Видно, що відмінний від нуля впродовж тривалого часу τ_2 усереднений квадрат спіральності $\langle \alpha^2 \rangle$ викликає зростання від'ємного значення коефіцієнта спіральної дифузії η_T^α . Це призводить до зменшення ефективного коефіцієнта дифузії η_T^* у порівнянні зі значенням звичайної турбулентної дифузії η_T . Якщо час кореляції флуктуацій спіральності τ_2 в два-три рази перевищує час існування турбулентних вихорів $\tau_1 \approx l/u$ (циркуляція рідини в спіральному вихорі за цей час встигає скласти великий кут), то від'ємне значення η_T^α може перевищити позитивну величину η_T . В ротаційних небесних тілах для виникнення ефекту негативної дифузії необхідні великі кути закручування $\Phi = \Omega \tau_2 = 2\pi\tau_2/T$ ($T = 2\pi/\Omega$ – період обертання) магнітних силових ліній конвективних комірок [18]. Очевидно, можна очікувати виконання умови $\Phi \gg \pi$ в космічних тілах з великою швидкістю обертання, які встигають зробити багато обертів за час життя окремого спірального вихору τ_2 (тобто у випадку, коли виконується умова $T < \tau_2$). Нами було розглянуто питання про можливість виконання цієї умови в глибоких шарах СКЗ (де найвища кутова швидкість диференційного обертання). Для оцінок в першому наближенні ми приймаємо припущення, що час τ_2 збігається з часом існування турбулентних комірок $\tau_1 \approx l/u$. Необхідні для розрахунків параметри турбулентної конвекції було взято із двох моделей СКЗ: Спруїта [20] і Стікса [22]. Виявилось, що поблизу дна СКЗ конвективні комірки можуть закручуватися на досить великі кути $\Phi \approx 7-13$ рад. Відповідно, розрахована величина негативного коефіцієнта спіральної турбулентної магнітної дифузії $\eta_T^\alpha \approx -(4-7) \cdot 10^{12} \text{ см}^2/\text{с}$ сягає двох третій величини позитивного коефіцієнта турбулентної дифузії скалярного поля $\eta_T \approx (6-9) \cdot 10^{12} \text{ см}^2/\text{с}$ ($\eta_T^\alpha \approx -0,7 \eta_T$). Тому коефіцієнт сумарної турбулентної дифузії магнітного поля виявляється істотно пригніченим: $\eta_T^* = \eta_T + \eta_T^\alpha \approx 0,3 \eta_T$. Таким чином, маломасштабний α^2 -ефект в глибинних шарах СКЗ може суттєво сприяти самоорганізації слабких неперервних магнітних полів у дискретні МСТ. Спливаючи на сонячну поверхню, очевидно, самі ці дискретні поля формують спостережену картину магнетизму, в якій присутні ізольовані МСТ в широкому діапазоні розмірів і інтенсивності полів (від пор до сонячних плям).

Список використаних джерел

1. Вайнштейн С.И., Зельдович Я.Б., Рузмайкин А.А. // Турбулентное динамо в астрофизике. – М.: Наука, 1980. – 352 с.
2. Зельдович Я.Б. Магнитное поле при двумерном движении проводящей жидкости // ЖЭТФ. – 1956. – 31. – С.154-156.
3. Зимин В.Д., Фрик П.Г. Турбулентная конвекция. – М.: Наука. – 1988. – 174 с.
4. Криводубский В.Н. О турбулентной проводимости и магнитной проницаемости солнечной плазмы // Солн. данные. – 1982. – №7. – С.99-109.
5. Криводубский В.Н. О самоорганизации магнитных полей в солнечной турбулентной плазме // Вісник КНУ. – 2013. – 50. – С.26-30.
6. Ладиков-Роев Ю.П., Черемных О.К. Математические модели сплошных сред. – Киев: Наукова думка. – 2010. – 552 с.
7. Рабинович М.И., Сушик М.М. Когерентные структуры в турбулентных течениях // Нелинейные волны: Самоорганизация. – М.: Наука. – 1983. С.56–85.
8. Ebeling W., Klimontovich Yu.L. Selforganization and Turbulence. – Leipzig: Teubner-Verlag. –1984.
9. Frisch U., Pouquet A., Liorat I., Mazure A. Possibility of an inverse cascade of magnetic helicity in magnetohydrodynamic turbulence // Journ. Fluid Mech. – 1975 – 68. – P.769-778.
10. Gibson E.G. The Quiet Sun. – Washington: Scientific and Technical Information Office, NASA. – 1973.
11. Haken H. Advanced Synergetics. – Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo: Springer-Verlag. –1983. – 356 p.
12. Kolesnichenko A.V., Marov M.Ya. The effect of spirality of turbulence in the solar protoplanetary cloud // Solar System Research. – 2007. – 41. – P.1-18.
13. Kraichnan R.H. Diffusion of weak magnetic fields by isotropic turbulence // J. Fluid Mech. – 1976a. – 75. – P. 657-676.
14. Kraichnan R.H. Diffusion of passive-scalar and magnetic fields by helical turbulence // J. Fluid Mech. – 1976b. – 77. – P. 753-774.
15. Krause F., Rädler K.-H. Mean-Field Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory // Berlin: Akademie-Verlag, 1980.
16. Krivodubskii V.N. Turbulent effects of sunspot magnetic field reconstruction // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. – 2012. – 28, No.5. – P.232-238.
17. Moiseev S.S., Chkhetiani O.G. The helical scaling of turbulence // JETP. – 1996. – 110, No 7. – P.357-371.
18. Parker E.N. Cosmic Magnetic Fields. – Oxford: Oxford University Press. – 1979.
19. Prigogine I., Nicolis G. Self-Organization in Non-Equilibrium Systems. – Wiley. – 1977.
20. Spruit H. // A convection zone model/Magnetic flux tubes and transport of heat in the convection zone of the Sun. Thesis. – Utrecht: Univ. Utrecht. – 1977. – P.17-34.
21. Starr V.P. Physics of Negative Viscosity Phenomena. – Toronto London Sydney: McGraw-Hill Book Company. – 1968.
22. Stix M. The Sun. 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag. – 2002.

Надійшла до редколегії 03.07.14

V. Krivodubskij, д-р физ.-мат. наук, старш. науч. сотр.
КНУ имени Тараса Шевченко, Киев

МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В ПРИРОДЕ И НА СОЛНЦЕ

Сделан обзор явлений самоорганизации в природе, обусловленных негативной турбулентной вязкостью плазмы. Проанализировано роль маломасштабного α^2 -эффекта Крейчнана в образовании дискретных магнитных полей в солнечной конвективной зоне (СКЗ). Последний эффект вызывает уменьшение суммарного коэффициента турбулентной магнитной диффузии. Проведенные нами расчеты для двух моделей СКЗ показали, что в глубинных слоях величина отрицательного коэффициента спиральной турбулентной диффузии векторного магнитного поля составляет около двух третей величины положительного коэффициента турбулентной диффузии скалярного поля. Это должно в значительной степени способствовать самоорганизации первоначально слабых непрерывных магнитных полей в тонкие изолированные магнитные силовые трубки.

Ключевые слова: макроскопические структуры, Солнце.

V. Krivodubskij, Dr. Phys. and Math. Sciences
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

MACROSCOPIC STRUCTURES IN NATURE AND THE SUN

The review of self-organization phenomena in nature, caused by negative turbulent viscosity of the plasma, was made. The role of small-scale α^2 -effect by Kraichnan in the formation of discrete magnetic fields in the solar convective zone (SCZ) was studied. This effect causes a decrease in the total coefficient of turbulent magnetic diffusion. The results of our calculations for two models of the SCZ have shown that the value of the helical negative coefficient of turbulent diffusion of vector magnetic field in the deep layers reaches about two thirds of the value of the positive coefficient of turbulent diffusion of scalar field. This should greatly facilitate self-organization initially continuous weak magnetic fields in the thin isolated magnetic field tubes.

Keywords: macroscopic structure, Sun.