

2D-МГД-МОДЕЛЮВАННЯ СОНЯЧНОЇ МАГНІТОГРАНУЛЯЦІЇ: ГОРИЗОНТАЛЬНІ МАГНІТНІ ПОЛЯ

В. Шемінова

*Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного, 27, Київ, 03680, Україна*

(Отримано 26 грудня 2008 р. в остаточному вигляді — 11 січня 2010 р.)

Досліджено сонячні горизонтальні магнітні поля на шкалах, менших, ніж просторова роздільна здатність сонячних телескопів. Для цього використано результати двовимірного магнітогидродинамічного моделювання нестационарної сонячної магнітогрануляції в ділянках магнітної супергрануляційної сітки та проаналізовано відгуки синтезованих профілів Стокса інфрачервоної лінії Fe I 1564.85 нм. Отримано, що просторово усереднена беззнакова напруженість горизонтальних магнітних полів на рівні оптичної глибини $\tau_5 = 1$ дорівнює 244 Гс, тоді як найбільш імовірна величина досягає 50 Гс. У фотосфері до рівня 400 км середня беззнакова напруженість горизонтальних полів у середньому більша в 1.3 рази, ніж вертикальних, унаслідок більшої їхньої густини та площі, яку вони займають. Результати аналізу синтезованих профілів Стокса щодо горизонтальних магнітних полів якісно узгоджуються з результатами спектрополяриметричних спостережень на космічній обсерваторії “Hinode”.

Ключові слова: Сонце, фотосфера, магнітні поля, поляризація

PACS number(s): 96.60.-j, 96.25.Ln, 96.60.Mz

I. ВСТУП

Спектрополяриметричні спостереження на орбітальній сонячній обсерваторії “Hinode” [11] виявили нові властивості магнітних полів у фотосфері Сонця. Згідно з результатами цих спостережень [14, 16] просторово усереднена напруженість горизонтального магнітного поля в міжсіткових ділянках спокійного Сонця (internetwork fields) досягає 55 Гс і перевищує в 5 разів середню напруженість вертикального поля. Горизонтальні поля займають більшу площу поверхні, ніж вертикальні, і розташовані ближче до країв гранул і міжгранул. Типовий розмір структур горизонтальних полів трохи менший, ніж розмір гранул, і більший, ніж типовий розмір структур вертикальних полів. Крім того, горизонтальні поля просторово ізолювані від вертикальних.

Узагалі даних про властивості горизонтальних полів у фотосфері Сонця досі було не так багато. Вперше горизонтальні поля спостерігали в міжсіткових ділянках фотосфери як короткочасні (5 хв) явища, пов’язані з руйнуванням малих біполярних магнітних потоків, що виходять на поверхню Сонця [13]. Наявність горизонтальних полів у спокійних ділянках фотосфери підтвердили результати інверсії профілів Стокса, одержані в праці [18], а також результати спостережень низьких петель (біполей) [5, 15, 17, 21] та уніполярних плям магнітного потоку [19], що виходять на поверхню Сонця. Нові свідчення про велику кількість горизонтальних полів у фотосфері були наведені в роботі [8], згідно з магнітографічними спостереженнями всього диска Сонця.

Для з’ясування природи горизонтальних магнітних полів у міжсіткових ділянках фотосфери недавно були проаналізовані результати тривимірного (3D) магнітогидродинамічного (МГД) моделювання спокійної

фотосфери в роботах [23, 25]. Автори підкреслюють, що фотосферні горизонтальні поля тісно пов’язані з проникаючою конвекцією. Основним джерелом горизонтальних полів у фотосфері спокійного Сонця є наявність там магнітних полів змішаної полярності, які створюються дією локального динамо поблизу поверхні Сонця. На підставі аналізу інших можливих механізмів, у роботі [23] відзначено, що на утворення горизонтальних полів у ділянках супергрануляційної магнітної сітки і у факельних площадках, крім динамопроцесів, впливають також процеси рециркуляції загального фонового потоку грануляції.

Значно менше відомостей одержано на цей час про горизонтальні поля в ділянках магнітної супергрануляційної сітки (network) та у факельних площадках (plages), де звичайно спостерігається дещо сильніший вертикальний магнітний потік, ніж у спокійних ділянках на поверхні Сонця. Тільки недавно стало відомо, за результатами спостережень на “Hinode” [9], що у факельних ділянках теж з’являються ізолювані плями горизонтальних полів із різною напруженістю, яка може досягати понад 580 Гс. Це найсильніші горизонтальні магнітні поля, які спостерігали досі на поверхні Сонця.

Мета цієї статті — проаналізувати результати двовимірного (2D) МГД-моделювання сонячної магнітогрануляції [3] в ділянках супергрануляційної сітки щодо горизонтальних полів; дослідити відгуки синтезованих профілів Стокса інфрачервоної лінії Fe I 1564.85 нм на горизонтальні поля; вивчити властивості цих полів на шкалах, менших, ніж просторова роздільна здатність сучасних телескопів.

Щодо термінології в цій статті. Основна характеристика магнітного поля — магнітна індукція — в астрофізичному контексті відповідає напруженості магнітного поля. Крім того, в астрофізиці також вико-

ристовують такі терміни, як потік магнітного поля (або магнітний потік), густина магнітного потоку та просторово усереднена напруженість поля.

У зв'язку з тим, що в різних статтях часто є плутанина при використанні цих термінів, ми нагадаємо їхнє визначення, наведене в роботі [10]. **Напруженість магнітного поля** — це модуль вектора магнітного поля \mathbf{B} , який як правило, задається в гауссах (Гс). **Магнітний потік** через поверхню S визначається як $\int_S \mathbf{B} d\mathbf{S}$. Задається магнітний потік у максвеллах (Мкс). Якщо інтегрування здійснити для вертикальної компоненти вектора магнітного поля, тобто $\int_S B_{\text{ver}} dS$, тоді отримаємо поздовжній (або вертикальний) магнітний потік. Величина поздовжнього магнітного потоку залежить не тільки від площі, але також від ефекту погашення магнітних полів протилежної полярності. Поздовжній магнітний потік із будь-якої ділянки поверхні Сонця можна виміряти за допомогою магнітографа та поляриметра, які продукують сигнал циркулярної поляризації V/I .

За аналогією до поздовжнього магнітного потоку вводять поняття горизонтального магнітного потоку, тобто $\int_S B_{\text{hor}} dS$, використовуючи горизонтальну компоненту вектора магнітного поля, B_{hor} . Горизонтальний потік магнітних полів на поверхні Сонця продукує сигнал лінійної поляризації Q/I в поляриметрах, який значно слабший, ніж сигнал V/I . **Густина поздовжнього магнітного потоку** визначають як $\int_S B_{\text{ver}} dS / \int_S dS$ і позначають $\langle B_{\text{ver}} \rangle$. Густині магнітного потоку вимірюють у Мкс/см², що еквівалентно Гс. Найчастіше в астрофізиці використовують **просторово усереднену напруженість магнітного поля** (або середню напруженість поля) $\langle |B| \rangle = \int_S |B| dS / \int_S dS$. Для поздовжнього поля її визначають як $\langle |B_{\text{ver}}| \rangle = \int_S |B_{\text{ver}}| dS / \int_S dS$. Підкреслимо, що в цьому випадку інтегрування виконують для напруженості поля, взятої без знака, тоді як для визначення густини магнітного потоку завжди використовують напруженість зі своїм знаком. Про цю різницю між густиною магнітного потоку та середньою напруженістю поля слід завжди пам'ятати.

II. МОДЕЛЬ МАГНІТОГРАНУЛЯЦІЇ

У цій статті використано 2-год послідовність 2D-МГД-моделей магнітогрануляції, яка докладно була описана в [1, 3, 7]. Верхні й нижні граничні умови для швидкостей і термодинамічних величин задавали вільними, тобто відбувалося вільне падіння (витікання) речовини. Верхні й нижні граничні умови для магнітного поля задавали як $B_{\text{hor}} = 0$, $\partial B_{\text{ver}} / \partial z = 0$. Бічні умови були періодичними, що означає багатократне дзеркальне відображення області моделювання в обидва боки. По висоті область моделювання простягається на 685 км вище і 1135 км нижче від рівня поверхні $Z = 0$ км. Горизонтальний розмір області — понад 4000 км, що відповідає 5.5'' на диску Сонця. Просторовий крок обчислювальної сітки — 35 км. У роботі [22] показано, що взагалі просторова роз-

дільна здатність для чисельного МГД-моделювання відповідає двом-трьом крокам обчислювальної сітки. Для даних 2D-МГД-моделей роздільна здатність становить 70–100 км або 0.1 – 0.15''.

2D-МГД-моделювання починається з уведення біполярного магнітного поля в заздальгідь одержану гідродинамічну 2D-модель термічної конвекції. Просторово усереднена напруженість початкового магнітного поля по всій області моделювання була 54 Гс. Через 30 хв від початку МГД-моделювання магнітне поле стає повністю узгодженим з конвекційними рухами плазми. Тому для інтерпретації спостережень відібрана 1.5-год послідовність МГД-моделей після перших 30 хв моделювання. Роздільна здатність у часі становить 1 хв протягом першої години моделювання та 0.5 хв протягом наступних 30 хв. Ця послідовність містить 126 2D-моделей, кожна з яких своєю чергою містить 112 1D-моделей. Усього можемо одержати 14 112 вимірювань напруженості магнітного поля. Це дає змогу нам виконати статистичний аналіз даних і виявити властивості горизонтальних полів на будь-якому рівні по висоті в модельованій області фотосфери.

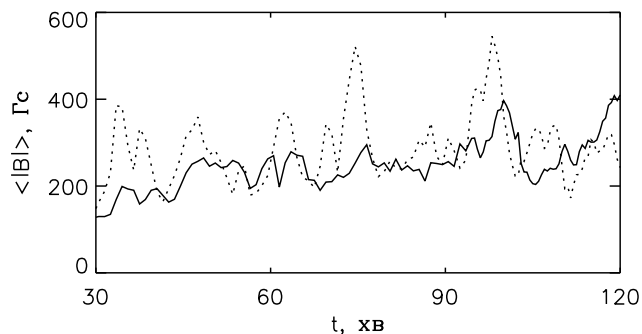


Рис. 1. Усереднена напруженість магнітного поля на рівні поверхні $\tau_5 = 1$ для послідовності 2D-МГД-моделей залежно від часу моделювання. Суцільна лінія — $\langle |B_{\text{ver}}| \rangle$. Пунктирна лінія — $\langle |B_{\text{hor}}| \rangle$.

Середня по області моделювання напруженість вертикального й горизонтального складників магнітного поля на рівні оптичної глибини $\tau_5 = 1$ для $\lambda 500$ нм зображена на рис. 1. Із часом середня напруженість горизонтального поля на поверхні підсилюється внаслідок процесів вимітання конвекційними потоками магнітного поля з глибоких шарів і накопичення його у верхніх шарах гранул. Через деякий час накопичені на поверхні у плямах горизонтальні поля починають слабшати. Поле перетікає в міжгранульній ділянці, змінюючи орієнтацію на майже вертикальну. У вузьких міжгранульних проміжках після досягнення вертикальними полями рівня рівнорозподілу вступає в дію конвекційний колапс, який то підсилює вертикальне поле у вертикальних магнітних трубках до 2000 Гс, то зовсім руйнує ці трубки. Докладний аналіз процесів магнітоконвекції, виконаний у роботі [1], показав, що посилення середньої напруженості магнітного поля та її осциляції відбуваються внаслідок

дії проникаючої конвекції, що весь час повторюється. Конкретний приклад локальної рециркуляції грануляційного потоку наведено також у роботі [20] за даними 2D-моделювання магнітогрануляції.

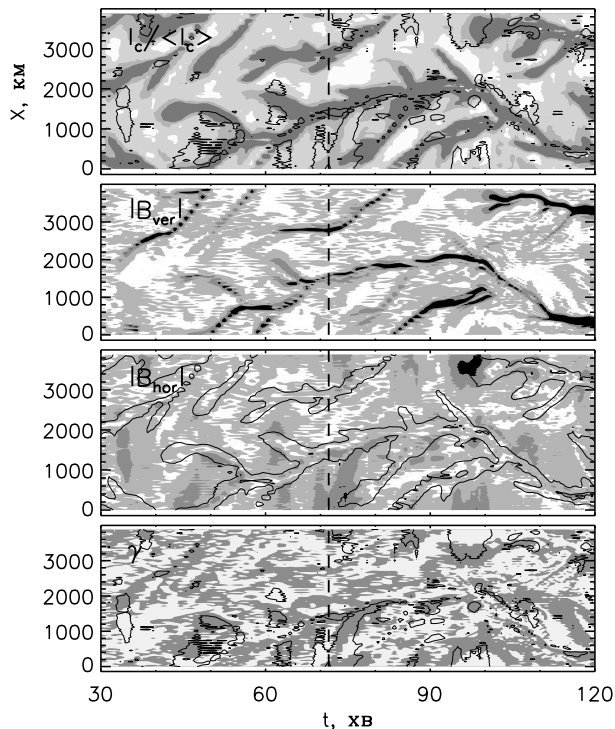


Рис. 2. Просторово-часова еволюція двовимірної моделюваної магнітогрануляції на рівні формування континууму $\tau_5 = 1$. Перша панель (зверху) — відносна інтенсивність неперервного випромінювання на довжині хвилі 500 нм. Градація від темного до світлого кольору відповідає значенням $I_c / \langle I_c \rangle < 0.8$; $0.8 \dots 1$; $1 \dots 1.3$; > 1.3 . Контурами відзначено області плям горизонтальних полів з $500 < B_{hor} < 1000$ Гс. Друга панель — напруженість беззнакового вертикального складника $|B_{ver}|$ з градацією від світлого до темного кольору для значень $|B_{ver}| < 100$; $100 \dots 500$; $500 \dots 1000$; > 1000 Гс. Третя панель — напруженість беззнакового горизонтального складника $|B_{hor}|$ з аналогічною градацією напруженості. Контури відзначають області міжгранульних проміжків. Нижня панель — кут нахилу вектора магнітного поля γ з двома градаціями для позитивних (світло-сіра) і негативних (темно-сіра) значень γ . Контури показують області плям горизонтальних полів. Вертикальна штрихова лінія вказує на область, для якої на рис. 5 показано вертикальний перетин.

Рис. 2 демонструє просторово-часові зміни поля радіації та напруженості вектора магнітного поля на рівні $\tau_5 = 1$ для цієї послідовності 2D-МГД-моделей магнітогрануляції. Просторово-часове зображення інтенсивності в континуумі $I_c / \langle I_c \rangle$ показує еволюцію грануляції. Між темними вузькими звивистими смужками (міжгранульні проміжки) видно світлі області (гранули). Виразно видно фрагментацію гранул, коли одна велика гранула розділяється на дві. Також видно зменшення горизонтального розміру гранул з посиленням магнітного потоку в моделюваній області. У просторово-часовому зображен-

нях вертикального $|B_{ver}|$ та горизонтального $|B_{hor}|$ складників магнітного поля зроблено однаково градацію величини напруженості поля, щоб можна легко порівнювати їхні величини й займані ними площі. Як видно, відмінність між вертикальними та горизонтальними полями велика як за формою структур, так і за величиною щільності магнітного потоку. Плями сильних горизонтальних полів здебільшого випадків розташовані ближче до міжгранульних проміжків. Ті плями, які розташовуються в центрі гранули, як правило, передують початку фрагментації гранули і формуванню нових магнітних трубок. Докладніше процеси фрагментації гранул описані в наших попередніх роботах [3,7]. Зображення полярності магнітного поля γ демонструє, як сильно перемішані на малих шкалах магнітні поля, направлені до спостерігача і від нього.

Слід ще звернути увагу, що на рис. 2 (друга панель) сильні вертикальні магнітні концентрації в загальних рисах нагадують спостережувані магнітні структури фотосферної супергрануляційної сітки, оточеної слабкішими змішаними полями. Зазначимо, що середня напруженість вертикального магнітного поля на рівні поверхні $\tau_5 = 1$ в області моделюваної магнітогрануляції близька до середньої напруженості, що спостерігається в областях фотосферної сітки [12], і на порядок більша, ніж середня напруженість поля в міжсіткових областях. Амплітуди профілів Стокса спектральних ліній, які ми обчислили для цієї моделюваної області, в середньому теж на порядок більші, ніж спостережувані в міжсіткових областях. Звідси ми зробили висновок, що 1.5-год послідовність МГД-моделей [3] відтворює вихід магнітного потоку через фотосферу в області сітки, а не в міжсіткових областях.

III. ВІДНОШЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУЖЕНОСТІ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ДО ВЕРТИКАЛЬНОГО

На рис. 3 (зліва) показані залежності беззнакової напруженості горизонтального $|B_{hor}|$ і вертикального $|B_{ver}|$ складників, усереднених за простором і часом для 1.5-год послідовності 2D-МГД-моделей, від оптичної глибини. Як змінюється з висотою у фотосфері відношення між ними, показано справа. Видно, що у фотосфері середня напруженість горизонтального поля вища за напруженість вертикального аж до рівня $\lg \tau_5 \approx -3$ ($Z \approx 350$ км). Максимальне значення відношення $\langle |B_{hor}| \rangle / \langle |B_{ver}| \rangle = 1.5$.

Для докладнішого вивчення розподілу напруженості горизонтального $|B_{hor}|$ і вертикального $|B_{ver}|$ складників магнітного поля по поверхні можна використовувати функцію густини ймовірності, яку зазвичай позначають як PDF (Probability Density Function). Рис. 4 показує одержані PDF для $|B_{ver}|$ і $|B_{hor}|$ на рівні $\tau_5 = 1$. Найбільш ймовірні значення $|B_{ver}|$ і $|B_{hor}|$ дорівнюють 50 Гс, а середні значення дорівнюють 192 і 244 Гс, відповідно. Звідси фактор перевищення горизонтальної компоненти поля над верти-

кальною в середньому по області на рівні $\tau_5 = 1$ дорівнює 1.3.

Використовуючи формули [6], ми на підставі одержаних PDF обчислили фактор заповнення α , який визначає частку поверхні, займаної слабкими, помірними й сильними полями. Назвемо умовно слабкими, помірними, сильними горизонтальними магнітними полями такі поля, напруженість яких $|B_{\text{hor}}| < 500$ Гс; $500 \leq |B_{\text{hor}}| < 1000$ Гс; $|B_{\text{hor}}| \geq 1000$ Гс відповідно. Аналогічно називатимемо і вертикальні поля. Відзначимо, що, на відміну від спостережень, поверхня досліджуваної модельованої області вся покрита магнітним полем, тобто фактор заповнення магнітним полем дорівнює 1. Окрім α , ми також обчислили ϕ — частку беззнакового магнітного потоку слабких, по-

мірних і сильних полів, а також ε — частку магнітної енергії, яку вони створюють, щодо повної магнітної енергії, що створюється всіма полями. Вони показують, що в модельованій області фотосферної сітки слабкі горизонтальні поля займають найбільшу площу (72%), становлять 28% загального магнітного потоку і 15% загальної енергії (слабкі вертикальні поля дають лише 8% енергії). Помірні горизонтальні поля займають 18% площі, становлять 20% загального потоку і дають найбільший внесок у загальну енергію (30%), тобто стільки ж, скільки й сильні вертикальні поля. Сильні горизонтальні поля займають 10% площі, становлять 2% загального потоку і 5% загальної енергії, тоді як сильні вертикальні поля займають 24% площі й дають 30% загальної енергії.

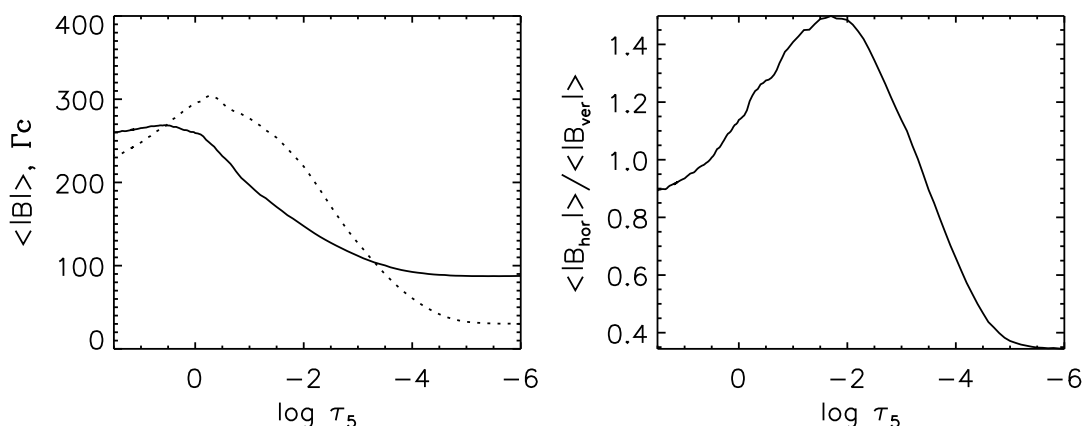


Рис. 3. Зліва — усереднені горизонтальний і вертикальний складники беззнакової напруженості магнітного поля для 1.5-год послідовності МГД-моделей залежно від висоти у фотосфері. Суцільна лінія відповідає $\langle |B_{\text{ver}}| \rangle$, пунктирна лінія $\langle |B_{\text{hor}}| \rangle$. Справа — відношення напруженості горизонтальної компоненти магнітного поля до вертикальної.

На рис. 2 всі ці поля добре видно. Наприклад, помірні горизонтальні поля справді виглядають як невеликі плями. Вони в основному біполярні, і тривалість їхнього життя близько 3–6 хв. Часто такі плями з'являються не в центральних областях гранул, а у прикордонних із міжгранулами. До сильних горизонтальних полів належить, наприклад, пляма з координатами $X = 3600$ км і $t = 95.5$ хв, яка розташована в крупній гранулі, перед початком її фрагментації. Видно також, що сильні вертикальні поля (або вертикальні трубки), на відміну від сильних горизонтальних полів (або горизонтальних трубок), концентруються в міжгранульних проміжках. Ці вертикальні трубки у просторово-часовому зображенні магнітного поля мають вигляд мережі сильних вертикальних полів на поверхні модельованої області, схожих на спостережувані поля фотосферної сітки на магнітограмах.

IV. ГОРИЗОНТАЛЬНІ ПОЛЯ ЗА ДАНИМИ СТОКС-ДІАГНОСТИКИ

Для дослідження горизонтальних магнітних полів за даними спектрополяриметричних спостережень,

як правило, аналізують відгук лінійної і кругової поляризації Зеємана у спектральних лініях. Ми також проаналізували профілі Стокса (I, Q, V) лінії Fe I 1564.8 нм, синтезовані в межах 2D-МГД-моделей уздовж променя зору в кожній точці модельованої поверхні, що відповідає спостереженням у центрі диска Сонця, зроблених одночасно у смузі довжиною 4000 км через кожні 35 км на поверхні з повторенням через кожну 1 хв. протягом 1 год та через 0.5 хв протягом наступних 30 хв. Спектральна роздільна здатність синтезованих профілів дорівнювала 5 mÅ в межах $\pm 1.5 \text{ Å}$ від центра лінії. Уміст заліза $A_{Fe} = 7.43$, сили осциляторів спектральної лінії $\lg gf = -0.675$ і потенціал збудження нижнього рівня $EP = 5.43$ eV. Сталу загасання Ван дер Ваальса обчислювали згідно з формулами [4]. Розрахунки виконували з використанням коду SPANSAT-M, що являє собою модифікацію коду SPANSAT [2].

За аналогією з інтерпретацією спостережень у праці [14], ми одержали $V_{\text{tot}}, Q_{\text{tot}}$ із синтетичних V, Q профілів Стокса, інтегруючи V, Q за довжиною хвилі. Відзначимо, що в разі 2D-МГД-моделювання інтенсивність U -профіля Стокса близька до нуля, тому його не враховуємо, обчислюючи загальну лінійну поляризацію.

Щоб обчислену кругову поляризацію V_{tot} та лінійну поляризацію Q_{tot} перевести в напруженості, виконували калібрування. Для цього знайдено залежності V_{tot} , Q_{tot} від B_{ver} , B_{hor} . Значення напруженості B_{ver} , B_{hor} виведені з 2D-МГД-моделей на рівні $\lg \tau_5 = -1$. Згідно з нашими розрахунками, саме цей рівень фотосфери в середньому відповідає ефективній висоті формування профілів Стокса лінії Fe I 1564.8 нм. За допомогою калібрувальних кривих ми одержали з кожної пари синтетичних V , Q профілів середню напруженість магнітного поля для горизонтального B_{hor} і вертикального B_{ver} складників і побудували відповідні PDF на рис. 4 (пунктирна лінія). Вони відрізняються від PDF, одержаних із прямих вимірювань B_{ver} , B_{hor} у межах МГД-моделей (суцільна лінія). Згідно з PDF, отриманими за профілями Стокса, найбільш імовірні значення беззнакової напруженості горизонтального і вертикального складників магнітного поля дорівнюють 174 і 28 Гс, а середні значення становлять 310 і 188 Гс відповідно.

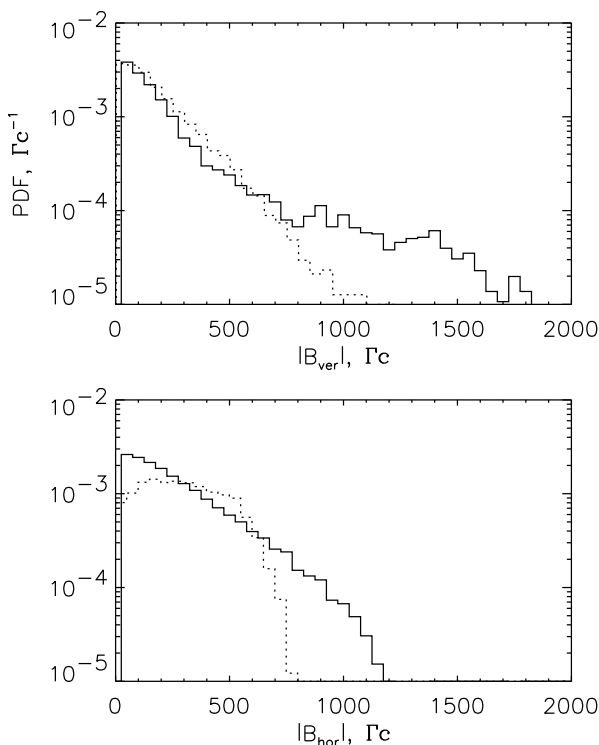


Рис. 4. Гістограми функцій густини ймовірності (PDF) для беззнакової напруженості вертикального та горизонтального складників вектора магнітного поля в 1.5-год послідовності МГД-моделей на рівні $\tau_5 = 1$. Суцільна лінія відповідає даним МГД-моделювання, пунктирна лінія — даним Стокс-діагностики.

Фактор перевищення середньої напруженості горизонтального поля дорівнює 1.6. Нагадаємо, що з прямих вимірювань, за даними МГД-моделювання, відповідно одержано: 50 і 50 Гс; 244 і 192 Гс; тобто фактор перевищення дорівнював 1.3. Отже, фактор перевищення, виведений з аналізу профілів Стокса, вийшов більшим, ніж за даними МГД-моделювання,

внаслідок завищеної оцінки щільності горизонтальних полів, одержаної за допомогою калібрувальної кривої. Це означає, що калібрування сигналів лінійної поляризації при інтерпретації спостережень може вносити додаткову помилку до оцінки напруженості горизонтального поля.

Відзначимо, що в роботі [25], де використані результати 3D-МГД-моделювання міжсіткових областей фотосфери, аналогічні фактори перевищення були 2.0–5.6 (МГД-дані) і 1.5–2.8 (Стокс-діагностика).

Отримані фактори за даними Стокс-діагностики менші, ніж за модельними даними. На наш погляд, причиною тут може бути те, що в аналізі [25] амплітуди лінійної поляризації в міжсіткових полях на порядок нижчі, ніж у полях магнітної сітки. Це може негативно вплинути на точність Стокс-діагностики і калібрування Стокс-сигналів.

Згідно з даними спектрополяриметричних спостережень, одержаних з просторовою роздільною здатністю 0.3'' на борту "Hinode", просторово усереднена напруженість горизонтального складника магнітного поля в міжсіткових областях становить приблизно 55 Гс [14, 16], а у факельних площадках вона досягає 580 Гс [9]. Для досліджуваної в цій роботі модельованої області, яка відтворює область спостережуваної супергрануляційної сітки і її найближчого оточення, просторово усереднена напруженість горизонтального складника поля дорівнює 244 Гс, що не суперечить спостереженням.

Згідно з результатами нашого аналізу відношення середньої напруженості горизонтального складника магнітного поля до вертикального складника в середньому дорівнює 1.3, а максимальне значення досягає 1.5 для магнітної сітки. Це значно менше, ніж одержано зі спостережень у міжсіткових областях, де фактор перевищення становить 5 згідно з результатами [14]. Менший фактор перевищення, який ми одержали, мабуть, можна пояснити більшою концентрацією дрібномасштабних сильних вертикальних магнітних полів сітки (магнітних трубок) у модельованій області фотосферної сітки, ніж у спостережуваних міжсіткових спокійних областях.

Спостереження факельних площадок [9] виявили вихід ізольованих горизонтальних полів у вигляді великих плям розміром 1.4'' × 1''. Тривалість їхнього життя приблизно 6 хв. Вони з'являються всередині гранули, поступово рухаючись до міжгранульних проміжків, і потім зникають із поля зору. Напруженість горизонтального поля в цих плямах може досягати 580 Гс. Згідно з нашими результатами схожі за розмірами і тривалістю життя плями сильних горизонтальних полів мають напруженість у діапазоні 500–1000 Гс. Такі плями можуть з'являтися всередині гранул на поверхні модельованої області (див. рис. 2, третя панель).

Щоб показати, що ж спонукає до виникнення плям горизонтальних полів на поверхні, ми на рис. 5 відтворили моментальний знімок вертикального перетину модельованої області у момент моделювання $t = 71.5$ хв. Окрім сильної вертикальної трубки, видно

також компакту концентрацію горизонтальних полів з напруженістю 500–1000 Гс на поверхні (біля рівня $Z = 0$ км). Проникаючі конвекційні рухи з нижніх підфотосферних шарів виносять із собою магнітні по-

ля до середніх і верхніх шарів фотосфери. Це діють так звані процеси вимітання магнітних полів (flux expulsion). Їхній докладний опис можна знайти в роботах [23, 25].

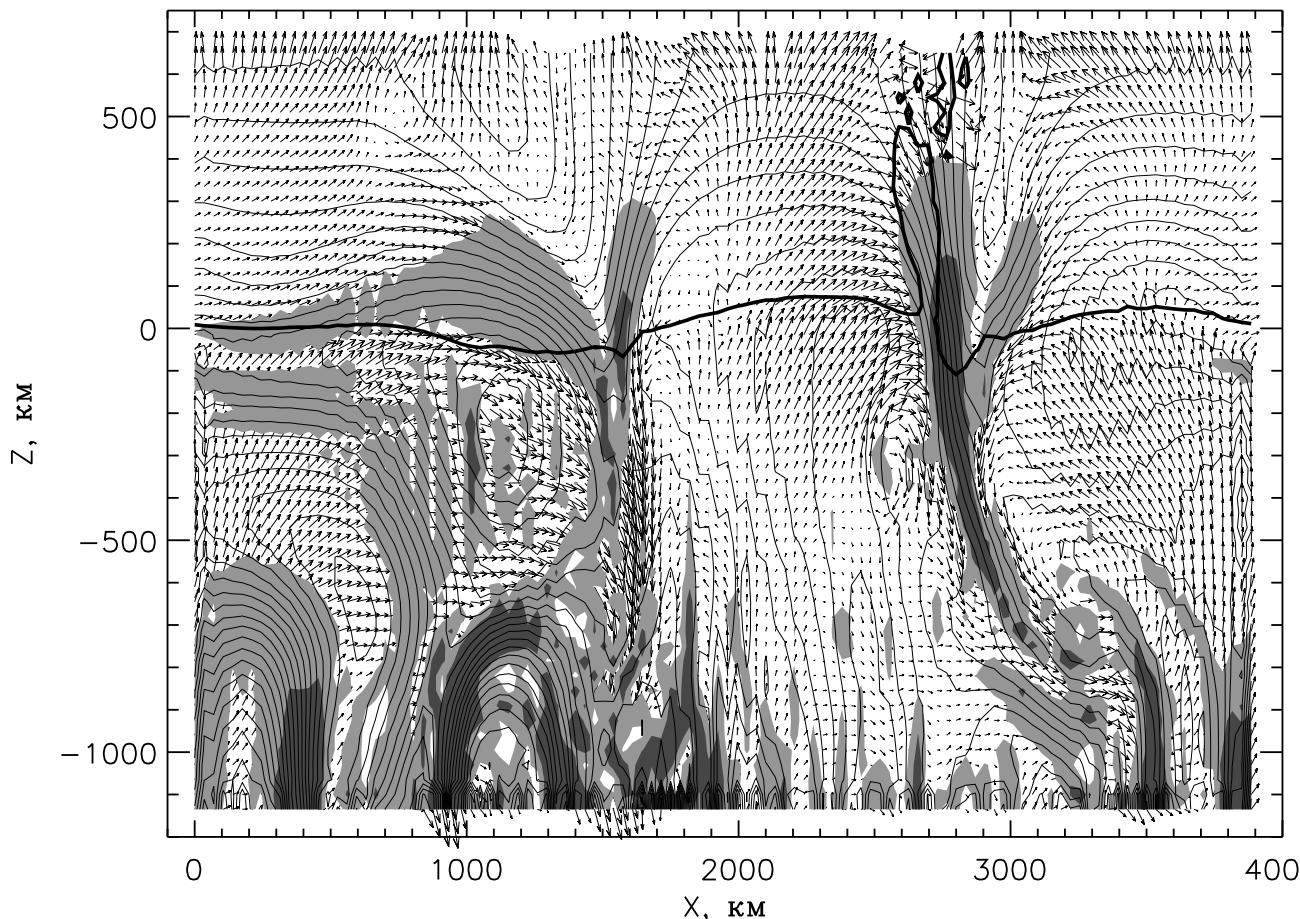


Рис. 5. Моментальний знімок вертикального перетину моделюваної області для $t = 71.5$ хв. Жирна лінія — ізотерма для $T = 5500$ К, яка приблизно вказує рівень середньої оптичної глибини $\tau \approx 1$. Суцільні тонкі лінії — магнітні силові лінії. Сірим штрихуванням відзначено вертикальні й горизонтальні поля з напруженістю в діапазоні 500–1000 Гс, а темно-сірий колір відповідає напруженості вище 1000 Гс. Стрілки вказують напрям швидкості руху речовини в кожній точці розрахункової сітки, а їхня довжина пропорційна величині швидкості.

З аналізу результатів 2D-МГД-моделювання виходить, що сильні горизонтальні концентрації (або трубки) не піднімаються високо у верхні шари фотосфери. Тому на рис. 1 перевищення середньої щільності горизонтального складника над вертикальним проявляється в основному в шарах нижньої й середньої фотосфери. Також тому на рис. 2 (третя панель) добре видно, що на рівні $\tau_5 = 1$ займана горизонтальними полями площа значно перевищує площу вертикальних полів.

Слід відзначити на рис. 5 температурну особливість (різке підняття ізотерми для $T = 5500$ К) біля вертикальної магнітної трубки ($X = 2800 - 2900$ км) у фотосферних шарах (0–500 км). Це добре відомий ефект гарячої стінки (hot wall) магнітної трубки у фотосфері, зумовлений депресією Вілсона. На поверх-

ні Сонця завдяки депресії Вілсона, утворюються значні поглиблення. В цьому випадку таке поглиблення становить близько 200 км. Радіація дуже гарячих підфотосферних шарів легко проникає всередину трубки, тому що речовина трубки має більшу прозорість, ніж її оточення. Внаслідок цього нагріваються передусім стінки трубки. Якраз цей ефект можна спостерігати на поверхні Сонця в молекулярній G-смугі як яскраві точки [24].

Відгук синтетичних профілів Стокса лінії заліза 1564.8 нм на горизонтальні й вертикальні поля в 1.5-год послідовності МГД-моделей дає фактор перевищення 1.6. Це втричі, ніж одержано зі спостережуваних профілів Стокса лінії заліза 630.2 нм [14] у міжсіткових областях. Основна причина розбіжності між спостереженнями й нашими результатами мо-

делювання, мабуть, полягає у відмінності величини магнітного потоку в спостережуваній і моделюваній областях. З іншого боку, одержаний фактор перевищення не сильно відрізняється від факторів 1.5 і 2.8, виведених у роботі [25] з використанням синтетичних профілів Стокса лінії 630.2 нм і двох послідовностей 3D-МГД-моделей міжсіткових областей. Зазначимо, що результати моделювання міжсіткових полів у праці [25] не відтворюють задовільно фактора 5 [14], не зважаючи на те, що середня напруженість магнітного поля в 3D-МГД-моделях приблизно дорівнює спостережуваній. Можливою причиною цього є недостатньо точне калібрування спостережуваних сигналів лінійної поляризації. Не виключено також, що у спостереженнях [14] середня напруженість вертикального магнітного поля недооцінена внаслідок недостатньої просторової роздільної здатності спектрополяриметричних спостережень, яка не краща, ніж 0.3'' (або близько 200 км). У такому випадку напруженість магнітних структур, дрібніших, ніж 200 км, які мають протилежні полярності поля, може погашатися, і вони не будуть враховуватися при оцінці просторово усередненої напруженості поля.

Слід також відзначити, що 2D-МГД-моделювання магнітоконвекції, результати якого використані в нашому аналізі, теж має свої обмеження й недоліки. Насамперед, до них належить двовимірне представлення грануляційних рухів. Розтікання речовини в 2D-області моделювання відбувається у площині, що може вплинути на величину поля швидкостей, і можливо, на величину напруженості магнітних полів. Магнітні трубки формуються між двома гранулами, тоді як у сонячній фотосфері дрібномасштабні елементи спостерігаються у проміжках на стику трьох або більше гранул. У моделюванні розглядається тільки грануляційний масштаб сонячної конвекції, і початкове магнітне поле вводиться в ГД-моделі штучно. Щоб зрозуміти і прослідкувати утворення областей магнітної сітки, бажано враховувати крупніші масштаби сонячної конвекції, такі як мезо- і супергрануляція. Усе це може відбитися на кількісних оцінках, одержаних

у нашій роботі. Тому висновки, які наведено нижче, засновані на якісному аспекті результатів, одержаних у цьому аналізі.

V. ВИСНОВКИ

Проаналізовано горизонтальні магнітні поля на підставі 1.5-год серії 2D-МГД-моделей сонячної магнітогрануляції із середньою напруженістю поздовжнього магнітного поля близько 200 Гс. Ця серія моделей відтворює область супергрануляційної сітки та її найближчого оточення у фотосфері Сонця. Отримані в нашому аналізі результати моделювання і Стокс-діагностики якісно узгоджуються з результатами спостережень, виконаних на борту супутника "Hinode".

Основні висновки цього аналізу такі. Просторово усереднена напруженість горизонтального складника магнітного поля в ділянках супергрануляційної сітки перевищує середню напруженість вертикального складника на фотосферних висотах від 0 до 400 км. Слабкі магнітні поля з напруженістю горизонтального складника < 500 Гс займають більшу площу поверхні на рівні $\tau_5 = 1$ і дають більший внесок до загальної магнітної енергії, ніж слабкі вертикальні поля < 500 Гс. Помірні магнітні поля з напруженістю горизонтального складника в діапазоні 500–1000 Гс можуть концентруватися в невеликих плямах, розташованих у прикордонних областях гранул і міжгранул. Ці плями часто є біполярними. Їхні розміри дещо менші за горизонтальний розмір гранул, а тривалість життя становить 3–6 хв. Виникнення горизонтальних магнітних полів на поверхні Сонця тісно пов'язане з процесами проникаючої конвекції, такими, як вимітання магнітного потоку та локальна рециркуляція грануляційного потоку. Їхня напруженість залежить від магнітного потоку, який виходить на поверхню в конкретній області фотосфери. Середня напруженість горизонтальних полів у ділянках магнітної сітки майже в 4.5 рази більша, ніж у ділянках міжсіткових полів.

-
- [1] A. C. Гадун, Кинем. физ. небес. тел **16**, 99 (2000).
 - [2] A. C. Гадун, В. А. Шеминова, препринт ИТФ-88-87 (Киев, 1988).
 - [3] A. C. Гадун, В. А. Шеминова, С. К. Соланки, Кинем. физ. небес. тел **15**, 387 (1999).
 - [4] P. S. Barklem, N. Piskunov, B. J. O'Mara, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **142**, 467 (2000).
 - [5] R. Centeno *et al.*, *Astrophys. J.* **666**, L137 (2007).
 - [6] I. Domínguez Cerdeña, J. Almeida Sánchez, F. Kneer, *Astrophys. J.* **407**, 741 (2003).
 - [7] A. S. Gadun, S. K. Solanki, V. A. Sheminova, S. R. O. Ploner, *Solar Phys.* **203**, 1 (2001).
 - [8] J. W. Harvey, D. Branstom, C. J. Henney, C. U. Keller, *Astrophys. J.* **659**, L177 (2007).
 - [9] R. Ishikawa *et al.*, *Astron. Astrophys.* **481**, L25 (2008).
 - [10] C. U. Keller, F.-L. Deubner, U. Egger, B. Fleck, H. P. Povel, *Astron. Astrophys.* **286**, 626 (1994).
 - [11] T. Kosugi *et al.*, *Solar Phys.* **243**, 3 (2007).
 - [12] B. W. Lites, *Astrophys. J.* **573**, 431 (2002).
 - [13] B. Lites *et al.*, *Astrophys. J.* **460**, 1019 (1996).
 - [14] B. Lites *et al.*, *Astrophys. J.* **460**, 1237 (2008).
 - [15] B. Lites, A. Skumanich, V. Martinez Pillet, *Astron. Astrophys.* **333**, 1053 (1998).
 - [16] B. Lites *et al.*, *Publ. Astron. Sos. Jpn* **59**, 571 (2007).
 - [17] M. J. Martinez González, M. Collados, B. Ruiz Cobo, S. K. Solanki, *Astron. Astrophys.* **469**, L39 (2007).
 - [18] N. Meunier, S. K. Solanki, W. C. Livingston, *Astron. Astrophys.* **331**, 771 (1998).
 - [19] D. O. Suárez *et al.*, *Astrophys. J.* **670**, L61 (2007).
 - [20] S. R. O. Ploner, M. Schüssler, S. K. Solanki, A. S. Gadun,

- in *Advanced Solar Polarimetry – Theory, Observation, and Instrumentation*, ed. M. Sigwarth, ASP Conf. Ser. **236**, 363 (2001).
- [21] B. De Pontieu, *Astrophys. J.* **569**, 474 (2002).
- [22] J. Sanchez Almeida, *Astron. Astrophys.* **450**, 1198 (2006).
- [23] M. Schüssler, A. Vögler, *Astron. Astrophys.* **481**, L5 (2008).
- [24] V. A. Sheminova, R. J. Rutten, L. H. M. Rouppe van der Voort, *Astron. Astrophys.* **437**, 1069 (2005).
- [25] O. Steiner, R. Rezaei, W. Schaffenberger, S. Wedemeyer-Bohm, *Astrophys. J.* **680**, L85 (2008).

**THE 2D MHD SIMULATION OF SOLAR MAGNETOGRANULATION:
HORIZONTAL MAGNETIC FIELDS**

V. Sheminova

*Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine
27 Akademika Zabolotnoho St., 03680, Kyiv, Ukraine*

The solar horizontal magnetic fields on scales less than the spatial resolution of solar telescopes are investigated. A synthetic infrared spectropolarimetric diagnostics based on the 2D MHD simulation of magnetoconvection in a network region is used for this purpose. We find that the spatial average unsigned magnetic horizontal field strength at $\tau_5 = 1$ is 244 G and the most probable strength is equal to 50 G. The magnetic horizontal field surpasses by the factor 1.3, on average, the vertical field at the range of heights 0–400 km in the photosphere. It is caused by the stronger flux density of horizontal field and the larger area fraction occupied by them. Strong horizontal magnetic fluxes are visible on the surface in the form of small spots with the strength more than 500 G. The results of the Stokes diagnostics with respect to horizontal magnetic fields are qualitatively in agreement with that observed aboard the “Hinode” satellite.