

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

Не превех рукопису

УДК 523.945

П І Ш К А Л О М И К О Л А І В А Н О В И Ч

Дослідження динамічних властивостей
хромосферних спікул і $H\alpha$ -мікробликидів
та їх ролі в сонячній атмосфері

01.03.03. Геліофізика та фізика Сонячної системи

А в т о р е ф е р а т
Дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

КИЇВ - 1994



00777142 (S)

Робота виконана в Астрономічній обсерваторії Київського університету ім.Тараса Шевченка.

Науковий керівник - кандидат фізико-математичних наук
Іванчук В.Г.

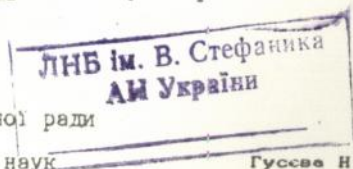
Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук
Цап Т.Т.
кандидат фізико-математичних наук
Гчляев Р.О.

Провідна організація - Інститут сонячно-земної фізики
Російської академії наук (м. Іркутськ)

Захист відбудеться 18 листопада 1994 р. на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д016.14.01 по захисту дисертацій при Головній Астрономічній обсерваторії Національної академії наук України за адресою: 252127, м.Київ-127, Голосіїво, Головна Астрономічна обсерваторія НАН України; початок засідань о 12 год

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Головної Астрономічної обсерваторії НАН України.

Автореферат розісланий "14" жовтня 1994 р.



Вчений секретар Спеціалізованої ради

кандидат фізико-математичних наук

Гусєв Н. Г.

Загальна характеристика роботи

Актуальність дослідження.

Спікули, що є основними структурними елементами сонячної хромосфери, досить інтенсивно досліджувалися на протязі останніх десятиріч. Але, не дивлячись на багаточисельні проведені дослідження, існуючі спостережні дані по спікулах є в значній мірі неповними та досить часто суперечливими. Особливо це стосується динамічних властивостей спікул. Інтерпретація спостережних даних також досить часто приводить до суперечливих результатів щодо властивостей спікул та процесів, що в них відбуваються. Все це не дає змоги створити задовільну теорію утворення спікул та побудувати прийнятливую у всіх відношеннях модель спікули.

В той же час як інтенсивні рухи із середніми швидкостями 25-30 км/с, що спостерігаються в спікулах і перевищують локальну швидкість звуку, так і відкриття в фотосферних шарах під спікулами підсилених магнітних полів, свідчать про їх зв'язок із потужними магнітогідродинамічними силами в середній і верхній хромосфері. Завдяки спікулам, напевне, відбувається інтенсивний обмін речовиною та енергією між хромосферою та короною, в результаті чого утворюються перехідний шар, корона та сонячний вітер. Все це свідчить про велику актуальність і важливість дослідження динамічних процесів у спікулах, пояснення природи яких залишається й досі однією з головних проблем фізики сонячної атмосфери.

Метою дисертаційної роботи є комплексне вивчення динаміки сонячних хромосферних спікул за спостереженнями на 53-см коронографах, дослідження властивостей мікрооксидів речовини, що спостерігаються в лінії $H\alpha$ в полярних районах, та оцінка ролі спікул і других мікротранзйентних явищ у сонячній атмосфері.

Методика досліджень. В дисертації використовуються спектральні спостереження спікул на 53-см коронографах та довготривала серія лімбових $H\alpha$ -фільтрограм; спектрограми та фільтрограми вимірювалися на вимірвальних машинах та фотометрувалися на мікрофотометрі ІФФ-451. При розрахунках профілів спікул використовувалися числові методи для ЕЧМ.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

1. Проведено комплексне дослідження динаміки $H\alpha$ -спікул на висоті 4200 км в сонячній хромосфері: вивчені тангенціальні (вздовж сонячного лімба) та доплерівські зміщення, нахили спектральних ліній відносно напрямку дисперсії, форми та ширини профілів емісійних ліній.

2. Отримана та опрацьована довготривала високоякісна серія спектрограм спікул в лінії $K\ Ca\ II$, що дало змогу прослідкувати за зміною спектральних параметрів K -спікул з часом.

3. Проведено розрахунки профілів ліній циліндричної спікули, що обертається, для різних спектральних ліній та різних умов у спікулі, в тому числі для умов нежорсткого

обертання. На основі порівняння середнього спостереженого профіля H α -спікули в момент часу поблизу максимуму її інтенсивності з теоретичними профілями спікул, що обертаються, зроблено висновок про нетвердотільний характер можливого обертання спікул (зовнішні шари обертаються швидше, ніж внутрішні) та про зменшення функції джерела у спікулі у напрямку від її осі до периферії.

4. В результаті вивчення тривалої серії лімбових H α -фільтрограм в районі полярної корональної діри знайдено невеликі компактні викиди речовини в корону, названі H α -мікровикидами, досліджено їхні властивості та можлива роль у балансі речовини та енергії в сонячній атмосфері.

5. Зібрано та частково проаналізовано практично всі існуючі дані по хромосферних спікулах.

Наукове та практичне значення роботи. Отримані результати є подальшим розвитком уявлень про структуру та динаміку сонячної хромосфери та корони. Зони можуть бути використані при побудові моделей верхньої атмосфери Сонця (хромосфери, перехідної зони та корони).

Основні положення, представлені до захисту.

1. Результати комплексного дослідження динаміки спікул із висновком про наявність руху речовини вздовж спікул та про неприйнятність чисто пренеційної картини руху спікул.

2. Розрахунок профілів ліній спікул, що обертаються, для різних умов обертання та висновок про нежорсткість характеру

можливого обернення спікул.

3. Відкриття мікровикидів речовини в лінії Na в полярній корональній дірі, результати вивчення їх властивостей та ролі в сонячній атмосфері.

4. Результати дослідження ролі спікул та інших мікротранзйєвентних явищ в атмосфері Сонця із висновком про визначальну роль спікул у балансі речовини.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в чотирнадцяти роботах, список яких наведено в кінці автореферата.

Особистий внесок автора. По темі дисертації опубліковано чотирнадцять робіт, з них три (5,7,13) - без співавторів та одинадцять - у співавторстві з науковим керівником В.Г.Іванчуком. У роботах (2,10-12) дисертанту належить опрацювання спостережень, одержання результатів, участь у обговоренні та в написанні статей. По роботі (3) дисертанту належить одержання спостережного матеріалу, опрацювання спостережень, одержання результатів, написання статті, участь в обговоренні результатів. В публікаціях (1,4,6,9,14) дисертантом виконана основна робота щодо збору та аналізу літературних матеріалів і по написанні статей. По роботі (8) дисертант приймав активну участь в зборі та аналізі даних та в підготовці доповіді.

Апровадження роботи. Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися на:

- XII Генеральній Асамблеї МАС в Гаазі (серпень 1994 р.),
- Всесоюзних конференціях з фізики Сонця в Алма-Аті (червень 1987 р.) та в Ашхабаді (жовтень 1990 р.),
- XII-й Консультативній нараді КАПТ з фізики Сонця пам'яті В.Є.Степанова (Одеса, вересень-жовтень 1988 р.),
- Всесоюзній школі-семінарі з фізики Сонця пам'яті проф. Г.М.Нікольського (Кисловодськ, вересень - жовтень 1986 р.),
- конференції молодих астрономів України (Київ, Голосієво, лютий 1985 р.),
- VI конференції молодих вчених Київського університету (Київ, березень 1985 р.),
- щорічних наукових конференціях професорсько-викладацького та наукового складу Київського університету в 1984-1992 рр.,
- наукових семінарах кафедри астрономії та лабораторії астрофізики та фізики Сонця Астрономічної обсерваторії Київського університету.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновка та списку літератури, що містить 336 бібліографічних назв. Загальний об'єм дисертації становить 187 сторінок, в тому числі 40 ілюстрацій та 16 таблиць.

Зміст роботи

У вступі показана актуальність роботи, сформульовані мета, наукове новизна роботи та положення, представлені до захисту, приведена структура роботи.

Розділ 1 носить переважно оглядовий характер. В ньому зібрані та частково проаналізовані сучасні дані по сонячних хромосферних спікулах. Проаналізовано дані з морфології (діаметри, висоти, кількість, нахили та орієнтація, групування), динаміки (час існування, еволюція, швидкості), параметри спектральних ліній (ширини та інтенсивності профілів) спікул та фізичні умови в них (температура, густина, магнітні поля). Дискутується проблема ототожнення спікул з деталями тонкої структури сонячної атмосфери, що спостерігаються на диску. Показано, що найбільш вірогідними кандидатами на ототожнення із спікулами при спостереженнях на диску в темні та яскраві тонкі вузлики. Розглянуто існуючі теорії та механізми утворення спікул, показано, що ні одна з них не узгоджується повністю із даними спостережень. Відмічається, що дуже часто дані спостережень та їх інтерпретація є суперечливими.

У другому розділі наведено оптичну схему великого 53-см коронографа конструкції ІЗМІРАН-ГАО. Описано методіку спостережень на ньому та методи визначення та контролю висоти при спостереженнях на коронографі. Також описано використання в роботі для дослідження динамічних властивостей спікул спостережний матеріал (серії спектрограм та окремі спектрограми спікул в різних хромосферних лініях), одержаний на коронографах в Батабеті, Кисловодську та Мюндах.

У третьому розділі приводяться результати дослідження динамічних властивостей хромосферних спікул по

спостереженнях на 53-см коронографях.

Розділ 3.1 знайомить з динамічними властивостями H α -спікул, що впливають з вивчення високоякісної серії спектрограм на висоті 4200 км над лімбом. Вимірні тангенційні (вздовж лімба) зміщення спікул, в результаті чого виділено чотири групи спікул за характером їх тангенційних зміщень. Для більшості спікул рухи вздовж лімба є характерними. Середня для всіх спікул швидкість таких рухів становить біля 9 км/с. У окремих спікул швидкості тангенційних зміщень сягають 50-60 км/с, а самі зміщення мають направлений характер. Визначено тангенційні (шляхом диференціювання графіків тангенційних зміщень) та променеві (шляхом фотометрування спектрів) швидкості H α -спікул, побудовані частотні розподіли цих швидкостей. Променеві швидкості мають розмах ± 50 км/с із середнім абсолютним значенням 11.7 км/с. У розподілі променевих швидкостей спостерігаються три максимуми: сильний - в районі 0 км/с і два слабших біля ± 30 км/с. Отримано оцінку для тривалості життя H α -спікул - 9-10 хвилин. Для спікул, які ототожнюються і простежуються на більшості спектрограм серії, побудовані траєкторії руху в проекції на фотосферу і в припущенні, що променеві і тангенційні швидкості є компонентами лише горизонтальних рухів спікул. Для жодної з 25 досліджених спікул не отримано замкнутої траєкторії її руху в проекції на фотосферу. Зроблено висновок про неприйнятливість чисто прецесійних рухів спікул. Променева швидкість відображає як рух речовини вздовж спікульної осі, так і зміщення вздовж

променя вору самої спікули.

Вивчено нахили спікульних спектрів відносно напрямку дисперсії. Побудовано розподіл вимірних значень нахилів. Отримано, що біля 28% нахилів є ненульовими. Середнє абсолютне для всіх нахилів значення становить 25', для ненульових нахилів - 1°25'. Знайдено випадки як практично незмінності значення нахилу на протязі часу біля 4 хвилин, так і випадки поступової зміни значення нахилу із зміною напрямку. Біля 50% спікул в різні моменти часу мають ненульовий нахил спектру відносно напрямку дисперсії.

Отримано, що розподіл спікул вздовж лімба не є рівномірним. Поруч з одинокими спікулами зустрічаються групи по 2-10 спікул з розмірами 5"-25".

Середнє значення діаметру H α -спікул на спектрограмах становить 1870 км. Зроблено висновок, що така велика розбіжність із фільтровими даними, які дають 800-900 км, обумовлена факторами замивання зображення внаслідок значно більшого часу експозиції спектрограм відносно фільтрограм.

В розділі 3.2 наведено результати дослідження динаміки K Ca II спікул по серії K-спектрограм на висоті 4500 км, отриманої автором на коронографі в Мондах. Тривалість життя K-спікул оцінено в 11 хвилин. Визначено променеві швидкості, напівширини та еквівалентні ширини профілів ліній. Побудовано розподіли цих параметрів, наведено приклади їх еволюції.

В розподілі променевих швидкостей K-спікул також існують локальні максимуми в районі значень $\pm 35-40$ км/с, але вони є

значно меншими. Середнє абсолютне значення променевої швидкості, що визначається по положенню максимуму інтенсивності профіля, становить 8.2 км/с, а по центру ваги профіля - 5.6 км/с. Максимальне значення променевої швидкості К-спікул становить 65 км/с. Як правило, великі променеві швидкості ($|V_r| > 20$ км/с) є притаманними для спікул на протязі невеликого проміжку часу (1-3 хв.). Для більшості спікул спостерігається зміна знаку променевої швидкості.

Емісійні профілі К-спікул не завжди є гаусовими; зустрічаються асиметричні, двовершинні та плосковершинні профілі, що свідчить про складну структуру спікул і поля швидкостей в них. Напівширини емісійних профілів К-спікул становлять 0.50-0.55 Å (від 0.35 Å до 0.89 Å). В лінійному наближенні залежність еквівалентної ширини W від напівширини $\Delta\lambda$ виражається формулою $W = 0.0119\Delta\lambda + 0.00008$, де W і $\Delta\lambda$ виражені в ангстремах. Часто зміни різних спектральних параметрів спікул відбуваються квазісинхронно.

Проаналізовані спостережені на 63-см коронографах значення ширин ліній $H\alpha$ та $H\beta$ $H1$, K Ca 11 , D_2 та $\lambda 10830A$ He I на висотах 4000-5000 км в хромосфері. Показано, що ширини ліній не узгоджуються в припущенні однакових температур і турбулентних швидкостей, що свідчить про наявність стратифікації світіння ліній різних атомів та про структурність самих спікул (розділ 3.3).

В розділі 3.4 проведено розрахунки профілів ліній спікул, що обертаються, для різних умов обертання та різних фізичних

умов у спікулах. Враховано також вплив функції земляння зображення. Отримані профілі ліній порівнюються із середнім спостереженим профілем $H\alpha$ -спікули для моменту життя спікули поблизу максимуму її світіння. Зроблено висновок про те, що можливе обертання спікул має нежорсткий характер: зовнішні шари спікули обертаються швидше, ніж внутрішні. Крім того, отримано, що функція джерела має зменшуватися від осі спікули до її периферії.

Щодо турбулентних рухів зроблено висновок, що середній спостережений профіль $H\alpha$ -спікули добре узгоджується із турбулентною швидкістю 31 км/с при температурі спікульної плазми 6000°K, але пояснення нахилу спектральних ліній відносно напрямку дисперсії є неможливим без обертальних рухів спікул.

Зроблене порівняння теоретичних значень нахилу спектру $H\alpha$ -спікули відносно напрямку дисперсії із спостереженим значенням також свідчить на користь висновку про нежорсткий характер можливого обертання спікул.

Четвертий розділ знайомить з результатами дослідження ролі хромосферних спікул в балансі речовини та енергії в сонячній атмосфері. Зроблено висновок про визначальну роль спікул у балансі речовини (4.1).

В розділі 4.2 описані мікровикиди речовини в лінії $H\alpha$, знайдені в північній полярній корональній дірі в результаті вивчення тривалої серії лімбових фільтрограм (спостереження доктора С.Кучмі на обсерваторії Сакраменто Пік). Мікровикиди мають розміри 3"-4" і рухаються радіально вгору із середніми

швидкостями 52 км/с без видимого сповільнення. За короткий час свого життя (2 хв.) вони встигають досягти висот 25"-35", де стають невидимими внаслідок повної іонізації. Запропоновано механізм їх утворення: перезамикання силових ліній магнітного поля та діемагнітне виштовкування плазмоїдів у силових лініях поля, що розходяться. Оцінюється можлива роль цих H α -мікровикидів речовини в сонячній атмосфері.

У розділі 4.3 спікули та H α -мікровикиди порівнюються з іншими мікротранзйентними утвореннями в сонячній атмосфері. Показано, що потік речовини, який може переноситися макроспікулами, H α -мікровикидами та H α -дузіями в корону, є недостатнім для забезпечення витрат речовини корони на сонячний вітер. Це підтверджує висновок про визначальну роль спікул в балансі речовини в сонячній атмосфері.

У висновках наведено основні результати й висновки роботи.

Основні результати і висновки роботи.

1. Розташування спікул вздовж лімба не є рівномірним; виділяються групи по 2-10 спікул з розмірами 5"-25". Характерним є присутність в групах спікул дифузного фону.

2. Емісійні спектри спікул досить часто мають нахил відносно напрямку дисперсії, що свідчить про можливу присутність обертальних рухів у спікулах. Спостерігаються випадки як незмінності значення нахилу на протязі часу біля 4 хвилини, так і випадки поступової зміни значення нахилу

спектра із зміною напрямку.

3. Для більшості спікул є характерною присутність тангенційних зміщень вздовж лімба, середня швидкість яких на висоті 4200 км складає біля 9 км/с.

4. Спікули з великими променевими швидкостями, як правило, мають коротку тривалість життя. Для звичайних спікул великі променеві швидкості (більше 20 км/с) є характерними на протязі короткого часу їх еволюції.

5. Променеву швидкість спікули не можна вважати лише компонентом її повної горизонтальної швидкості. Променева швидкість відображає як рух речовини вздовж спікульної осі, так і поперечні зміщення самої спікули.

6. Середня тривалість життя К Са 11 спікул на висоті 4500 км приблизно становить 11 хвилин.

7. Неможливо узгодити спостережені значення ширин спектральних ліній різних атомів у спікулах на одній і тій же висоті при однакових значеннях температури та турбулентної швидкості. Це свідчить про наявність стратифікації світіння в спікулах і про їх структурованість.

8. Можливе обертання спікул має нежорсткий характер: зовнішні шари спікули обертаються швидше, ніж внутрішні. Крім того, функція джерела також зменшується від осі спікули до її периферії.

9. Спікули грають визначальну роль у балансі речовини в сонячній атмосфері. Речовина, що піднімається в спікулах, частково іде в корону і далі виноситься в міжпланетний простір у вигляді сонячного вітру; більша його частина знову

повертається в нижню хромосферу як в самих спікулах, так і у вигляді постійного падаючого потоку речовини, що спостерігається на границях супергранул в лініях ультрафіолетового діапазону.

10. В районах полярних корональних дір існують і спостерігаються в лінії $H\alpha$ невеликі 3"-4" компактні викиди речовини, які рухаються радіально вгору із середньою швидкістю 52 км/с без помітного сповільнення. Ці мікрОВикиди встигають за 1-3 хв. досягти висот 25"-35" над фотосферним рівнем, де вони стають невидимими в лінії $H\alpha$ внаслідок повної іонізації водню.

Основні результати дисертації опубліковані у таких роботах:

1. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. Динамика хромосферных спикул. Лучевые, тангенциальные и видимые скорости (обзор). // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия. 1985. Вып. 27. С. 7-23.
2. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. Спектральные исследования динамики $H\alpha$ спикул. // Пробл. космич. физики. 1985. Вып. 20. С. 16-24.
3. Пишкало Н.И., Иванчук В.И. Спектральное изучение спикул в линии К Ca II. // Солнеч. данные. 1985. № II. С. 82-87.
4. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. Некоторые морфологические свойства хромосферных спикул. // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия. 1986. Вып. 28. С. 3-17.
5. Пишкало Н.И. Изучение наклонов спектров спикул. // Солнеч. данные. 1986. № 7. С. 82-85.

6. Пишкало Н.И., Иванчук В.И. Количество спикул и их отождествление с образованиями, наблюдаемыми на диске. // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия. 1987. Вып. 29. С. 3-14.

7. Пишкало Н.И. О вращении спикул. // В со.: Тезисы докладов Всесоюз. конфер. по физике Солнца, Алма-Ата, 22-26 июня 1987 г. Алма-Ата. 1987. С. III.

8. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. Микротранзиентные выбросы вещества в солнечной атмосфере и их связь с "корональным дождем", солнечным ветром и нагревом короны. // В со.: Тезисы докладов XIII Консультативного совещания КАПГ по физике Солнца (памяти В.Е.Степанова), Одесса, 26 сент. - 2 окт. 1988 г. М.: КАПГ, АН СССР. 1988. Т. 2. С. 4.

9. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. Ширины спектральных линий в хромосферных спикулах. // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия. 1989. Вып. 31. С. 3-16.

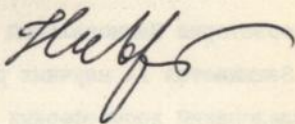
10. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. О динамике $H\alpha$ -спикул. // В кн.: Атмосфера Солнца, межпланетная среда, атмосфера планет. М.: АН СССР. ИЗМИРАН. 1989. С. 21-30.

11. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. Обнаружение хромосферных $H\alpha$ -микровыбросов вещества в полярной корональной дыре. // Кометный циркуляр. 1990. № 120. С.12-15.

12. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. Микровыбросы вещества в линии $H\alpha$ в полярной корональной дыре. // Солнеч. данные. 1992. № 8. С. 71-76.

13. Pishkalo M.I. Non-rigid rotation of solar spicules. // Astron. Nachr. 1994. Vol. 315, issue 5. P. 391-397.

14. Иванчук В.И., Пишкало Н.И. Солнечные хромосферные
спикулы. // Киев. Киев. ун-т. 1992. 126 с. - Деп. в УкрИНТЭИ
29.04.1992 г. № 543-Ук92.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Иванчук' (Ivanchuk), written in a cursive style.

Пашкало Н.И. Исследование динамических свойств хромосферных спикул и $H\alpha$ -микровыбросов и их роли в солнечной атмосфере. Диссертация в форме рукописи на соискание ученой степени кандидата физ.-мет. наук по специальности 01.03.03 - Гелиофизика и физика Солнечной системы, Главная Астрономическая обсерватория Национальной АН Украины, Киев, 1994.

Защищается 14 научных работ, которые содержат результаты исследований хромосферных солнечных спикул и $H\alpha$ -микровыбросов вещества. Установлено, что: 1) лучевая скорость спикул отражает как движение вещества вдоль спикульной оси, так и движение самой спикулы вдоль луча зрения; 2) возможное вращение спикул имеет нежесткий характер (наружные слои вращаются быстрее внутренних). Сделан вывод об определяющей роли спикул в балансе вещества в солнечной атмосфере.

Pishkalo M.I. An investigation of dynamical properties of chromospheric spicules and $H\alpha$ -microjets and their role in the solar atmosphere. Dissertation for Scientific Degree of Candidate of Phys. and Math. in Speciality 01.03.03 - Helio-phys. and the Solar System Phys., Main Astron. Observ. of the National Acad. of Sciences of the Ukraine, Kyiv, 1994.

The author defends 14 scientific publications containing results of investigations of solar chromospheric spicules and $H\alpha$ -microjets. Main results are: 1) radial velocity of spicules represents both the mass motion along the spicule axis and the motion of the spicule itself; 2) possible rotation of spicules is non-rigid (faster rotation further away from the axis of the spicule); 3) spicules play the principal role in the mass balance in the solar atmosphere.

Ключові слова: Сонце, атмосфера, хромосфера, спикули.

454544

AB 31.076