



ЧЕРЕМНИХ
Олег Костянтинович –
член-кореспондент НАН
України, заступник директора
Інституту космічних досліджень
НАН України та ДКА України

МОДЕЛЮВАННЯ ХВИЛЬОВИХ ТА ТУРБУЛЕНТНИХ ПРОЦЕСІВ У ПЛАЗМІ БЛИЖНЬОГО КОСМОСУ

Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 19 жовтня 2022 року

У доповіді наведено найважливіші результати, отримані останнім часом в Інституті космічних досліджень НАН України та ДКА України з моделювання колективних процесів у плазмі ближнього космосу. Окреслено низку математичних проблем, які потрібно розв'язати для опису спостережуваних явищ і подальшого планування космічних експериментів.

Шановні члени Президії! Шановні колеги!

Дякую за можливість представити до вашої уваги доповідь, яка стосується моделювання хвильових та турбулентних процесів у плазмі ближнього космосу. Чому йдеться саме про плазму і такі процеси в ній?

Річ у тім, що якщо не враховувати незрозумілі поки що стани речовини, які називають темною матерією чи темною енергією, то 99 % речовини в ближньому космосі (Сонце, його атмосфера, сонячний вітер, міжзоряне середовище, атмосфери планет і комет тощо) перебуває у стані плазми. Сонце — це взагалі згусток високотемпературної плазми й магнітного поля.

У повсякденному житті ми практично не стикаємося з плазмою, оскільки вона починає проявляти себе лише з висот близько 60 км, тобто в іоносфері Землі.

Плазма — це четвертий стан речовини; вона є іонізованим газом, у якому атоми повністю або частково дисоційовані на позитивно заряджені іони і негативно заряджені електрони. На відміну від нейтральних газів, частинки плазми взаємодіють одна з одною за допомогою далекодіючих електромагнітних сил. Тому в плазмі всі частинки беруть участь у колективних рухах, тобто основні властивості плазми зумовлені колективною взаємодією її заряджених частинок.

Чому ж так важливо вивчати плазму ближнього космосу? Я наведу лише три основні причини, хоча їх, звісно, набагато більше.

По-перше, ближній космос є гігантською природною лабораторією для вивчення тих властивостей плазми, які неможливо досліджувати у земних умовах на експериментальних установках. Для прикладу візьмемо всім сьогодні добре відому проблему керованого ядерного синтезу. Очевидно, що в умовах Сонця і в умовах установок типу токамак або стеларатор відбуваються різні процеси з різною фізикою.

По-друге, дослідження космічної плазми є важливою складовою вивчення космічного оточення Землі з метою його освоєння.

По-третє, вивчення плазми ближнього космосу сприяє глибшому розумінню стану навколосемного космічного простору і верхніх шарів атмосфери, що пов'язаний з так званою космічною погодою. Умовно ці процеси зводяться до вивчення впливу Сонця через навколосемну плазму на земне й космічне навколишнє середовище, роботу наземних і космічних технологічних систем, а також безпосередньо на діяльність та здоров'я людей.

Математичне моделювання процесів у ближньому космосі є невід'ємною частиною космічних інформаційних технологій. Серед методів дослідження плазми ближнього космосу найбільш поширеними є такі:

- супутниковий моніторинг процесів у ближньому космосі та розроблення методик відбору, ідентифікації та аналізу даних супутникових вимірювань;

- розроблення моделей процесів в іоносфері й магнітосфері Землі та атмосфері Сонця з використанням супутникових даних, методів і підходів системного аналізу;

- верифікація розроблених теоретичних та емпіричних моделей за супутниковими вимірюваннями і синтез спостережних даних та моделей (асиміляція даних);

- використання при побудові моделей чисельного моделювання, математичного апарату класичної механіки, звичайної та магнітної гідродинаміки, фізики плазми, а також лінійної алгебри, математичної та нелінійної фізики, методів спектрального аналізу, математичного апарату вейвлет-перетворень.

Далі наведу лише деякі приклади математичного моделювання колективних процесів у плазмі ближнього космосу. Почнемо з нижніх висот (близько 300 км), на яких літають супутники. У цьому випадку супутники вимірюють, зокрема, збурення швидкості, концентрації та температури середовища. Результати обробки супутникових даних та аналіз характеристик збурень на цих висотах свідчать про те, що ми маємо справу з акустико-гравітаційними хвилями.

Акустико-гравітаційні хвилі добре відомі дослідникам і, за сучасними уявленнями, є одним з найпоширеніших глобальних хвильових процесів в іоносфері Землі. Крім атмосфери Землі, ці хвилі наявні в атмосферах інших планет, а також в атмосфері Сонця. Математичну модель цих хвиль розробили канадець Колін Хайнс (Colin O. Hines) та американець Іван Толстой (Ivan Tolstoy) у 60-х роках минулого століття. У межах цієї моделі збурені величини описуються двома диференціальними рівняннями зі змінними коефіцієнтами. Розв'язок цієї системи у вигляді діагностичної діаграми наведено на рис. 1.

Проведені нами експериментальні вимірювання показали, що зображена на діагностичній діаграмі заборонена зона є не зовсім забороненою. Крім того, вже був відомий теоре-

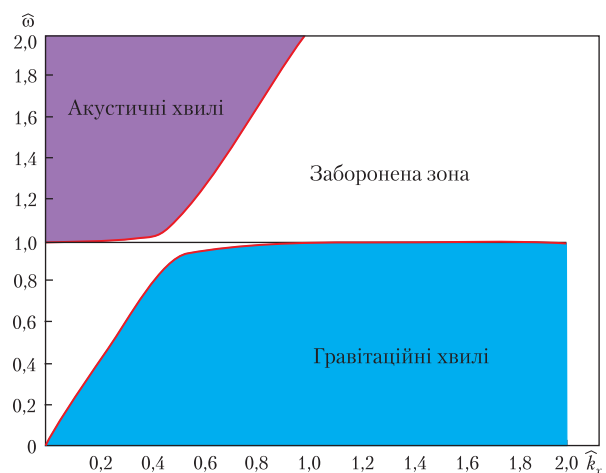


Рис. 1. Діагностична діаграма акустико-гравітаційних хвиль у моделі Хайнса-Толстого

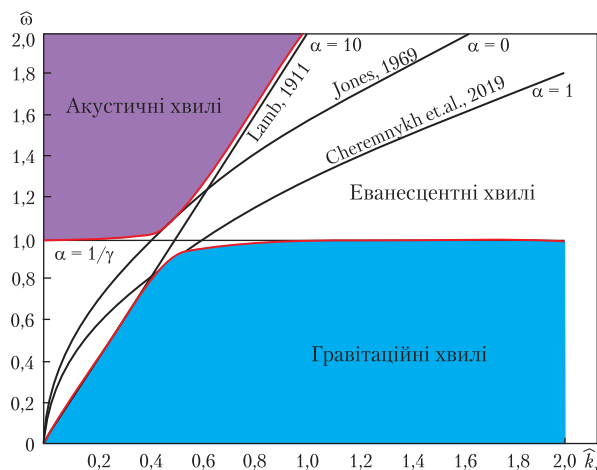


Рис. 2. Діагностична діаграма акустико-гравітаційних хвиль з урахуванням виявленого нового виду хвиль

тичний результат Лемба (1911), який свідчить, що хвилі можуть поширюватися у забороненій зоні. Згодом одна дослідницька група, а потім і ми, виявили дві моди в цій області. Отримані результати наводили на думку, що із забороненою зоною не все так просто. Ретельний аналіз рівнянь моделі Хайнса—Толстого показав, що з накладенням додаткової умови на амплітуди збурень реалізуються нові хвилі з неперервним спектром, що заповнює всю заборонену зону. Цей важливий для теорії іоносферних хвиль результат ми опублікували в 2021 р. в одному з найшанованіших світових фахових журналів — *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, і на сьогодні діагностична діаграма акустико-гравітаційних хвиль має вигляд, наведений на рис. 2.

Отже, одним із вагомих результатів, отриманих в Інституті космічних досліджень НАН України та ДКА України, є виявлення нового виду іоносферних хвиль — так званих еванесцентних хвиль, які мають неперервний спектр. Властивості цих хвиль було вивчено спільно з фахівцями Інституту прикладної математики ім. І. Векуа Тбіліського державного університету імені Іване Джавахішвілі.

Ще один важливий результат стосується акустичних збурень іоносфери. У 2006 р. вчені Інституту іоносфери НАН України і МОН

України проводили експеримент зі збудження іоносфери за допомогою мобільного акустичного випромінювача Львівського центру Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України. Експериментальні іонограми, які показують вертикальне розподілення іонізації у верхніх шарах атмосфери, засвідчили акустичний вплив на макроскопічні параметри іоносфери — три послідовні сигнали тривалістю 1 хв з періодом 2 хв. У співпраці з науковцями з Великої Британії та Мексики ми розробили нелінійну математичну модель випромінювання, яка показала можливість ефекту перетворення спеціальним чином модульованої акустичної хвилі на інфразвукову хвилю, а потім — на низькочастотну акустико-гравітаційну хвилю. З попередніх досліджень відомо, що низькочастотні інфразвукові хвилі мають приводити до підвищення прозорості іоносфери. Саме такий ефект і було зареєстровано радіотелескопом УРАН-3 під час проведення експерименту, що повністю підтверджує нашу модель трансформації хвиль. Результати цих досліджень свідчать про можливість діагностики динаміки іоносфери в середніх просторових масштабах. Однак для підтвердження цього висновку потрібно було провести наземно-космічний експеримент, який вдалося реалізувати в 2013 р. і який виявив трансформацію акустичних хвиль в інфразвуковій (рис. 3).

Розроблена нами модель враховує ефекти нелінійності, дифракції, дисипації та дисперсії і описує вертикальне поширення й перетворення акустичного пучка в неізотермічній атмосфері. Було встановлено, що область параметричного перетворення частоти розташована відносно низько (~100 м), так само, як і область розпаду акустичних хвиль різницевої частоти (~20 км). Розв'язки отримано чисельно-аналітичним методом на основі спектрального розкладу.

Інші два приклади стосуються поширення хвиль у магнітосферній плазмі. Магнітогідродинамічні збурення у плазмі внутрішньої магнітосфери Землі визначають загальну стійкість магнітосферної плазми і контролюють колективні процеси в ній. Їх дослідження є

пріоритетним напрямом у світовій космічній науці.

Рівняння для магнітогідродинамічних хвиль у криволінійній геометрії магнітного поля Землі за ступенем складності можна порівняти лише з деякими рівняннями для нелінійних хвиль. Спираючись на експериментальні дані, використані для аналізу цих рівнянь, ми запропонували застосування ейконального наближення. Отриманий за цією моделлю спектр досить добре узгоджується зі спостереженнями. Крім того, ми визначили критерії стійкості магнітосферної плазми, що пізніше було підтверджено в дослідженнях наших зарубіжних колег. Ці результати є важливими для розуміння природи глобальних процесів, які відбуваються в навколосезному космічному середовищі, а також для проведення в подальшому космічних експериментів, які плануються в Україні та інших державах.

У рамках проєкту, який ми виконували спільно з Мюнхенським університетом Людвіга-Максиміліана, для опису взаємодії потоку плазми сонячного вітру з плазмою хвоста магнітосфери було запропоновано використовувати модель, що описує нестійкість Кельвіна–Гельмгольца. Ця модель уточнює моделі, раніше запропоновані Л.Д. Ландау і С.І. Сироватським. Знайдене в рамках цієї моделі дисперсійне рівняння дозволило вперше пояснити виникнення турбулентності у хвості і генерацію пульсацій на нічному боці магнітосфери, що було спостережено у космічній місії Європейського космічного агентства і NASA «Кластер-2».

Далі дуже коротко розповім про отримані нами результати, які пов'язані з вирішенням математичних проблем при описі плазмових структур в атмосфері Сонця.

З використанням енергетичного методу спільно з ученими з Великої Британії нам вдалося вирішити фундаментальну проблему фізики Сонця — пояснити домінування стійких гвинтових збурень у структурах, які називають сонячними плазмовими трубками (рис. 4). Запропонований метод дав змогу визначити частоти хвильових збурень, не розв'язуючи при



Рис. 3. Схема двочастотної трансформації інфразвуку

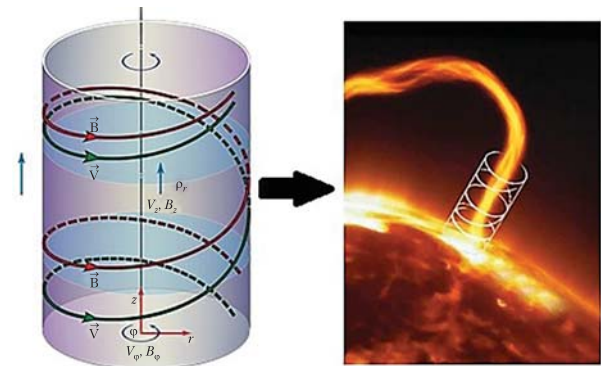


Рис. 4. Динаміка сонячних трубок

цьому тривимірні рівняння магнітогідродинаміки. Задачу було зведено до проблеми мінімізації потенційної енергії збурень, а розв'язок знайдено із застосуванням варіаційних методів. Показано, що струми на поверхні плазмового шнура відповідають за домінування і стійкість гвинтової моди.



Рис. 5. «Звичайний» корональний викид маси

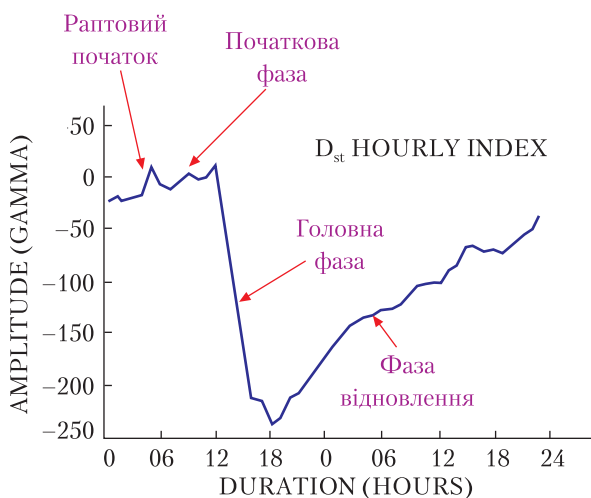


Рис. 6. Динаміка індексу тимчасового спаду (Dst) в період магнітних бур

Як відомо, тороїдальні плазмові утворення, що вилітають з поверхні Сонця, називають корональними викидами маси. Вони є найпотужнішими у ближньому космосі енергетичними плазмовими викидами речовини (10^{32} ерг) і відіграють важливу роль у формуванні космічної погоди. Корональні викиди маси реалізуються у вигляді плазмових кілець (рис. 5).

Вихрові кільця, або тороїдальні вихори, спостерігаються і в атмосфері Землі. З тих, що ми можемо побачити, це, наприклад, кільця диму, які вмюють випускати курці, кільця при пострі-

лах з окремих видів артилерії, в деяких видах хмар, у «грибі», який утворюється під час ядерного вибуху, тощо. Існування тороїдальних вихорів передбачив Джеймс Максвелл, а вираз для швидкості однорідного вихору дав лорд Кельвін, виходячи з інтуїтивних міркувань. Кілька окремих випадків для вихору Максвелла було проаналізовано протягом минулого століття. Ми показали, що у загальному випадку неоднорідні за перетином шнура вихрові кільця описуються нелінійним рівнянням типу Брега—Хотторна. Це рівняння було розв'язано методом багатьох масштабів, що дозволило вперше отримати аналітичні вирази для всіх параметрів вихору, зокрема для швидкості.

Ми також запропонували модель, згідно з якою корональні викиди маси є магнітно-вихровим кільцем. Для опису руху такого кільця було використано рівняння Гамільтона, отримані Ю.П. Ладіковим-Роевим. Чисельне розв'язання цих рівнянь засвідчило, що швидкість і розміри кільця узгоджуються зі спостереженнями. Час руху кільця від Сонця до Землі в нашій моделі становить 6 діб, що відповідає реальним спостереженням. Отриманий результат становить інтерес для експериментального дослідження корональних викидів маси, оскільки на сьогодні майже нічого не відомо про їхню внутрішню структуру.

Для оцінки потужності геомагнітних бур використовують індекс тимчасового спаду (Dst). Він характеризує розвиток збуреного магнітного поля в період магнітних бур і являє собою середню величину, розраховану за даними п'яти наземних станцій. Відомо, що Dst-індекс залежить від появи у сонячному вітрі південної компоненти магнітного поля. Поведінку Dst-індексу показано рис. 6.

Для короткострокового прогнозування поведінки Dst-індексу в часі ми використали модель нелінійної чорної скриньки. Як вхідний сигнал брали швидкість сонячного вітру, помножену на південну компоненту магнітного поля, а як вихідний — Dst-індекс. Якщо плазму магнітосфери вважати слабо турбулентною, тобто слабо нелінійною, то вихідний сигнал можна визначити з використанням ряду Волтерра. За допо-

могою процедури структурно-параметричної ідентифікації цього ряду було отримано задовільний прогноз на три години наперед.

На завершення доповіді хотів би зазначити, що в галузі моделювання процесів у ближньому космосі є ще досить велика кількість математичних проблем, які потребують розв'язання з метою опису спостережуваних явищ і планування космічних експериментів. Нові математичні підходи, зокрема, необхідні для прогнозування магнітних бур, опису турбулентних та нелінійних плазмових збурень тощо. На мою думку, цей науковий напрям має бути одним із пріоритетних у діяльності Відділення інформатики НАН України.

Важливим є також обмін інформацією з країнами-партнерами Європейського космічного агентства (ESA) та NASA для поповнення баз експериментальних даних та чисельних методів розв'язання систем диференціальних рівнянь у частинних похідних, а також участь установ НАН України в міжнародних космічних програмах і проєктах з дослідження ближнього космосу. Крім того, варто розглянути можливість створення в Академії спільних наукових підрозділів із зарубіжними космічними організаціями.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

Oleg K. Cheremnykh

Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6789-3382>

MODELING OF WAVE AND TURBULENT PROCESSES IN NEAR-SPACE PLASMA

Transcript of the report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, October 19, 2022

The report presents the most important results obtained recently at the Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine on the modeling of collective processes in near-space plasma. An array of mathematical problems that need to be solved for the description of observed phenomena and further planning of space experiments are outlined.