КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ім. ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

на правах рукопису
УДК 551.510

Зайцев Сергій Миколайович

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПЛАЗМОВИХ УТВОРЕНЬ В ІОНОСФЕРІ ЗЕМЛІ

01.04.02- теоретична фізика
01.03.02 - астрофізика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико - математичних наук

Київ - 1996

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00779437 (.)

Дисертація є рукописом

Работа виконана в Київському університеті ім. Тараса Шевченка

Наукові керівники: доктор фізико - математичних наук, професор Коцаренко М.Я.
кандидат фізико - математичних наук Міліневський Г. П.

Офіційні опоненти: доктор фізико - математичних наук Юхимук А.К.
доктор фізико - математичних наук, професор Чорногор Л.Ф.

Провідна організація: Інститут теоретичної фізики АН України

Захист відбудеться 27 квітня 1996 р. о 14.30 год. на засіданні спеціалізованої ради Д 01.01.26 по захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата фізико - математичних наук при Київському університеті ім. Тараса Шевченка за адресою:
252022, Київ-22, МСП, проспект Глушкова 6, фізичний факультет Київського університета ім. Тараса Шевченка, ауд. 500.
З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Київського університету ім. Тараса Шевченка.

Автореферат розісланий 22 квітня 1996 року.

Вчений секретар спеціалізованої ради
доктор фізико-математичних наук Поперенко Л.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Штучні плазмові хмари в іоносфері досліджуються вже майже тридцять років і стали потужним засобом вивчення електричних і магнітних полів, розподілу густини, температури і вітрів в іоносфері.

Перевага цього методу досліджень іоносфери полягає в тому, що є можливість широкого вибору просторових і часових параметрів експерименту, грунтовного забезпечення всебічних експериментальних спостережень та вимірювань, визначеність параметрів іоносферного збурення.

Інжекція плазми в іоносферу викликає магнітні, хвильові, радіо та інші збурення іоносфери. Окрім того об'єм, поверхня і форма самих інжектованих хмар зазнають велико- або дрібномасштабних збурень. Одним із найбільш характерних прикладів є стратифікація - розпад іонної хмари на волокна витягнуті вздовж геомагнітного поля.

Для адекватного розуміння фізичних процесів, що мають місце при інжекції іонної хмари, разом з проведенням експериментів розроблялись і їх математичні моделі. Адекватно побудована модель дозволяє не тільки пояснити результати експериментів, але й визначити параметри іоносфери а характеру та деталей поведінки іонної хмари, що і є основним призначенням експериментів по інжекції плазми в іоносферу.

Незважаючи на розвиток уявлень про динаміку та еволюцію штучних плазмових хмар і моделей, що описують ці процеси, лишається цілий ряд моментів, що потребують подальшого вивчення. За матеріалами досліджень лабораторії "Фізика космосу" Київського університету виявлено нові цікаві явища, не передбачені програмою досліджень в експериментах CRRES (Combined Releases and Radiation Effects Satellites). В першу чергу, до них належать явища, що мають місце при високошвидкістних супутникових інжекціях (наприклад, відділення тонких волокон від іонної хмари на дистанції гальмування). Для пояснення цих явищ необхідно розглянути деякі ефекти на початковій стадії інжекції.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Також на сьогоднішній день не існує єдиної моделі, що описує розвиток процесу стратифікації у ракетних експериментах у динаміці, її просторові та часові характеристики.

Мета роботи - побудова чисельних моделей, що адекватно описують особливості еволюції штучних плазмових хмар, такі як явище філаментації іонної хмари при супутниковій інжекції, стратифікація, а також дослідження впливу іоносфери на їх розвиток.

Наукова новизна. При дослідженні явищ, що мали місце в експериментах CRRES, було виявлено ряд нових явищ, у тому числі фрагментація іонної хмари на перших секундах після інжекції. Побудована фізична модель, що описує це явище. Окрім того, запропонована оригінальна тривимірна модель, яка описує початкову еволюцію штучної плазмової хмари при інжекції з орбітальними швидкостями.

Досліджені результати спостережень стратифікації у ракетних експериментах. Виявлені закономірності у розвитку цього явища. Побудована модель еволюції плазмових хмар, що враховує інерцію іонів і ряд інших факторів.

На основі нестійкості Релея-Тейлора пояснено явище поверхневої стратифікації в експериментах CRRES. Вперше досліджено явище хвильового збурення іонної хмари в експерименті CRRES G-11a і показано, що воно є проявом неоднорідної структури електричного поля іоносфери.

Практична цінність. Моделі, які розроблені в дисертації, можуть бути використані при аналізі експериментів по інжекції барію з борта штучних супутників та ракет та при підготовці нових експериментів.

На захист виносяться такі положення

1. Тривимірна модель початкової релаксації штучної плазмової хмари при інжекції з борту штучного супутника, яка враховує неоднорідність іоносфери.
2. Результати чисельного моделювання початкової еволюції плазмової хмари у експерименті CRRES G-9.
3. Експериментальні дослідженяя динаміки розвитку стратифікації у ряді ракетних експериментів по інжекції барію.
4. Модель еволюції штучної плазмової хмари з врахуванням інерції іонів, яка дозволяє адекватно описати явище стратифікації.
5. Теорія виникнення поверхневої стратифікації плазмових хмар на базі нестійкості Релея-Тейлора.

6.Експериментальні дослідження та інтерпретація хвильового збурення типу "дракон" у експерименті CRRES G-9.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на Міжнародній конференції "Високоширотні оптичні дослідження" (1993, Тромсе, Норвегія),20 (1993, Апатіти), 21 (1994, Лондон), 22 (1995, Хельсінкі) Європейских конференціях з досліджень атмосфери оптичними методами, міжнародному семінарі з фізики космічної плазми (червень 1993, Київ), Міжнародній конференції "Фізика в Україні" (22-27 червня 1993 р., Київ), II всеукраїнській науковой конференції "Сучасні фізико - математичні дослідження молодих науковців вузів України" (16-18 травня 1995 р., Київ), наукових семінарах астрономічної обсерваторії та кафедри астрономії і фізики космосу Національного університету ім. Тараса Шевченка.

Структура і об'єм дисертації. Об'єм основної частини дисертації - дисертації - 78 стор. Вона складається із вступу, трьох розділів і заключення. Список літератури, що цитується, має 91 найменування. Загальний об'єм дисертації - 90 стор.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в дев'яти роботах, список яких наведено у кінці авторефератy.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми та наукова новизна роботи, коротко описана її структура. Викладена мета роботи.

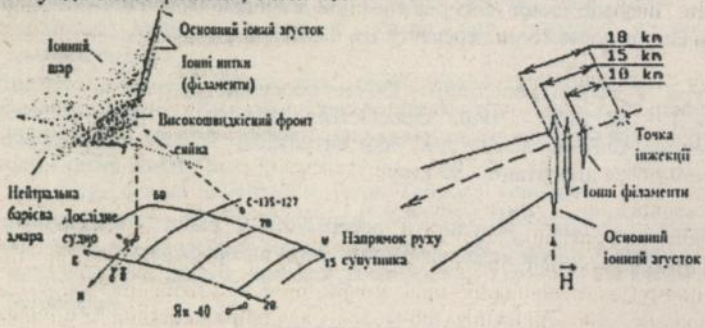
Перший розділ присвячено явищам, що мали місце при інжекції барієвих плазмових хмар з борту штучних супутників (експерименти CRRES Карибської серії) і розробці моделей, що адекватно пояснюють ці явища.

Експериментальним матеріалом глави є чотири інжекції барію в іоносферу (CRRES G-9, G-11a, G-11b, G-12). Їх основні характеристики наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1

Дата	Інжекція	Маса кг	Висота км	UT	Широта	Довгота
19.07.91	G-9	10.405	441	08:37:07	17.4N	62.8W
22.07.91	G-11a	1.371	411	08:38:24	16.8N	60.3W
25.07.91	G-11b	1.471	478	08:37:11	17.3N	69.5W
12.08.91	G-12	2.942	507	09:31:20	9.1N	63.5W

Найбільш цікавим з точки зору явищ, зареєстрованих оптичним засобом, виявився експеримент CRRES G-9. Спостереження цього експерименту проводилися в точці поблизу магнітного зеніту. Завдяки цьому були одержані унікальні матеріали і виявлені цікаві особливості динаміки хмари та її плазмової структури. Одним із них є високошвидкісний фронт дифузного сяйва, що розповсюджувався від місця гальмування іонної хмари зі швидкістю 7-10 км/с. Явище спостерігалось протягом 10 секунд після інжекції. Але найбільш цікавим ефектом було утворення двох іонних філаментів, що відокремились від основної іонної хмари на дистанції гальмування. Головний іонний згусток мав в діаметрі 3 км та її центр знаходився на відстані 18 км від точки інжекції, тонкі філаменти знаходились на відстані 10 та 15 км (22-а секунда спостережень, Мал. 1).



Малюнок 1. Схема спостережень штучної барієвої хмари та структури елементів в експерименті CRRES G-9.

Таким чином, ми змогли констатувати, що в експерименті G-9 мало місце гальмування іонізованого барію на протязі 3-х секунд з відокремленням тонких іонних філаментів від головної хмари.

Моделі, які існують на цей час, досить добре описують процес гальмування штучної іонної хмари при інжекції з орбітальними швидкостями, але жодна з них не пояснює відокремлення фрагментів від неї. Характерною рисою моделей, що описують динаміку штучних плазмових хмар при високошвидкісній інжекції є врахування інерційного члену у рівняннях руху іонів і того факту, що іони постійно утворюються з нейтралів. Результуюча система рівнянь, що описує динаміку штучної плазмової хмари має вигляд:

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \bar{\nabla}(N_e \bar{v}_e) = k_i N_n$$

$$\vec{\nabla}(\Sigma_e+\Sigma_b+\Sigma_n)(\vec{\nabla}\Phi-\vec{E}_0)+\vec{\nabla}(C_e+C_b)+$$
$$(\frac{\partial}{\partial t}+\vec{v}_e\vec{\nabla})(\vec{\nabla}\Phi-\vec{E}_0)=\vec{\nabla}(\frac{\vec{v}_n}{c}\times\vec{H})$$

$$\vec{v}_e=\frac{c}{H}(\vec{\nabla}\Phi-\vec{E}_0)\times\vec{e}_z$$

Тут Σ_e, Σ_b, Σ_n- провідності, що обумовлені рухом іонів хмари, іонів іоносфери та іонізацією нейтральної хмари, N_e- концентрація іонів хмари, $\vec{v}_e$- швидкість іонів,Φ - електричний потенціал, $\vec{H}$ - геомагнітне поле, $\vec{v}_n$ - швидкість нейтральних атомів, C_e,C_b - коефіцієнти, які враховують інерцію іонів, k_i - коефіцієнт іонізації. Усі величини проінтегровані вздовж геомагнітного поля. Ми також врахували фонове іоносферне електричне поле $\vec{E}_0$.

В попередніх роботах розподіл інтенсивності фотоіонізації у об'ємі хмари не брався до уваги. Ми запропонували просту модель неоднорідної іонізації. Згідно нашої моделі, k_i зменшується від переднього краю хмари (відносно сонця) до її центру, де $k_i=2\cdot10^8k_0/n_{max}$ ($k_0=1/28\ c^{-1}$, n_{max} - максимальна концентрація атомів нейтральної хмари). Область позаду центру нейтральної хмари вважається "тінню", де фотоіонізація не діє. Завдяки цьому на передньому краї хмари процес утворення іонів йде значно швидше. Це приводить до різкої неоднорідності електричного потенціалу іонної хмари, що в свою чергу може привести до її фрагментації на етапі, коли нейтральна хмара стає оптично прозорою і іонізація йде рівномірно по всьому її об'єму.

Нами було проведено чисельне моделювання експериментів CRRES G-9, G-11a, G-11b. Для умов експерименту G-9 спостерігалося відділення малого згустку плазми позаду основної іонної хмари, як це і мало місце в реальному експерименті. Якісна картина явища спостерігалась дуже добре. Було отримано критерії для фонового електричного поля і загальної кількість атомів, що інжектуються, при досягненні яких відбувається філаментація хмари. Для експериментів G-11a та G-11b ці умови не виконувались, і філаментація іонної хмари не спостерігалась.

Наведена модель якісно добре описує окремий випадок супутникової інжекції. Однак, значний інтерес являє собою задача побудови моделі, яка може бути використана для моделювання широкого ряду експериментів і отримання більш точних кількісних характеристик. При побудові такої моделі ми використали такі міркування:

- по перше, характерний час розповсюдження нейтралів та іонів уздовж геомагнітного поля на відстані порядку початкового розміру хмари

може бути порядка часу, коли хмара стає оптично прозорою і відбувається процес філаментації. Тобто, для адекватного опису явища філаментації необхідно враховувати довжину хмари вздовж поля, модель повинна бути тривимірною;

- по друге, ми врахували магнітне поле $\vec{H}$ (у наближенні $|\vec{H}| \le |\vec{H}|_0$), яке генерують струми у хмарі. Як показали оцінки, на перших секундах еволюції вони можуть вплинути на характер розвитку іонної хмари. Ми також врахували зіткнення іонів з нейтральними атомами хмари і використали модель неоднорідної іонізації.

Остаточна система рівнянь моделі має вигляд:

$$\Delta A_z = \frac{4\pi}{c}(\sigma_{e\perp} + \sigma_{b\perp})E_\parallel \qquad \vec{E} = -\vec{\nabla}\Phi + \vec{E}_0 - \frac{1}{c}\frac{\partial A_z}{\partial t}\vec{e}_z \qquad \vec{v}_e = -\frac{c}{H}\vec{E} \times \vec{e}_z$$

$$\vec{\nabla}_\perp \Big[(\sigma_{pe\perp} + \sigma_{pe\wedge} + \sigma_{pi\perp} + \sigma_{pb\perp} + \sigma_{pb\wedge})\vec{E}_\perp +$$

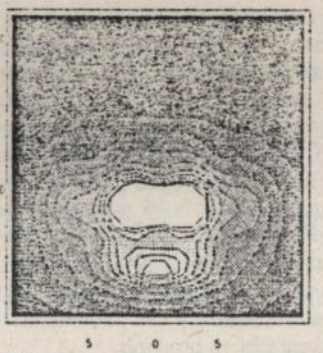
$$\frac{H^2}{c^2}(\sigma_{pe\perp} + \sigma_{pe\wedge})\vec{v}_{e\perp} + \frac{H}{c}(\sigma_{pe\perp} + \sigma_{pe\wedge})\vec{v}_{e\perp} \times \vec{e}_z +$$

$$(P_b + P_e)H\frac{\partial}{\partial t}\frac{\vec{E}_\perp}{H} + H(P_b + P_e)\vec{v}_{e\perp}\vec{\nabla}\frac{\vec{E}_\perp}{H}\Big] = -\frac{\partial}{\partial z}\sigma_{e\parallel}E_\parallel$$

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \vec{\nabla}(n_e\vec{v}_{e0}) = k_i n_n \qquad \frac{\partial n_b}{\partial t} + \vec{\nabla}(n_b\vec{v}_{e0}) = 0$$

Тут $\sigma_{pe\perp}$, $\sigma_{pe\wedge}$, $\sigma_{pi\perp}$ - провідності іонної хмари, обумовлені відповідно зіткненнями з нейтралами хмари, нейтралами іоносфери та іонізацією, $\sigma_{pb\perp}$, $\sigma_{pb\wedge}$ - провідності іоносфери, $\vec{v}_n$ - швидкість нейтральної хмари, P_b, P_e - коефіцієнти, обумовлені інерцією іонів хмари та іоносфери, n_e, n_n, n_b - концентрації іонної, нейтральної хмари та іонів іоносфери, $\vec{A}$ - магнітний потенціал. При моделюванні використовувався спеціально розроблений алгоритм.

Результати моделювання експерименту CRRES G-9 наведені на Мал 2. На ньому показано зріз концентрації іонної хмари у площині XY (z=0) для часу 3 с після інжекції. Максимуму відповідає концентрація 10^7 см$^{-3}$, контури проведені через 10^6 см$^{-3}$. Інжекція була проведена у точці (0,0). На відміну від попереднього моделювання ми одержали дуже добрий збіг часових і просторових параметрів філаментації. Моделювання проводилось до моменту відділення першого філамента.



Малюнок 2. Моделювання експерименту CRRES G9.

Таким чином, запропонована нами модель релаксації штучної плазмової хмари може бути використана для моделювання широкого класу експериментів по інжекції плазми з борта штучного супутника. Вона враховує неоднорідність іоносфери та деякі інші ефекти.

Друга глава дисертації присвячена явищу стратифікації, що спостерігалось у багатьох ракетних експериментах. Це явище полягає у розпаді іонної хмари на тонкі волокна, що зорієнтовані вздовж геомагнітного поля. Не дивлячись на велику кількість даних про розвиток стратифікованих структур в експериментах з інжекцією барієвих хмар, механізм подрібнення іонних згустків на дрібномасштабну структуру в деталях досі не зрозумілий. В деяких експериментах має місце укручення профілю концертрації іонної хмари на її передньому краї (відносно напряму дрейфу в перехресних полях) та витікання плазми у хвіст у вигляді іонних волокон-страт. У інших випадках відокрмлення страт від основної іонної хмари відбувається вперед, в напрямку дрейфу.

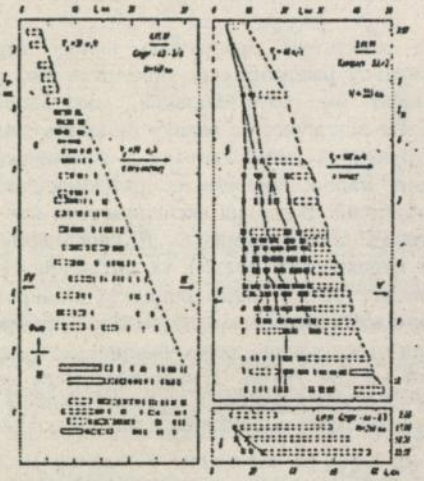
Для пояснення цього явища пропонувались різні механізми. Умовно їх можно розділити на дві групи. Перші тлумачать стратифікацію як ефект пов'язаний з впливом іоносфери, квазіперіодичними електричними полями, турбулентністю тощо. Інші пояснюють стратифікацію як процес властивий суто іонній хмарі та пов'язаний з плазмовими нестійкостями. З цих нестійкостей градієнтно - дрейфова найчастіше використовувалася для пояснення стратифікації. Інкремент цієї нестійкості $\gamma = \frac{V_D}{d_\perp}$, де V_D - швидкість дрейфу, $d_\perp$ - характерний розмір іонної хмари у поперек геомагнітного поля. Характерною рисою цієї нестійкості є те, що стратифікація спостерігається позаду хмари відносно напрямку дрейфу,

але в багатьох експериментах спостерігався протилежний випадок і відокремлення страт проходило попереду хмари.

Як було показано в попередніх роботах, відокремлення страт поперду хмари може бути пояснено, якщо врахувати інерцію іонів. Але аналітичні одномірні моделі, які розглядалися до цього часу, не спроможні кількісно провести порівняння з реальним експериментом.

У цьому розділі ми запропонували тривимірну модель, що пояснює розвиток стратифікації. Спочатку було докладно проаналізовано декілька експериментів по інжекції барію, щоб виявити характерні закономірності стратифікації і потім провести порівняння реального і чисельного експериментів. Зазначимо, що на відміну від інших робіт, нас цікавила динаміка процесу, оскільки адекватна модель динаміки іонної хмари повина пояснювати такі особливості, як момент початку стратифікації, час існування страт, їх швидкості та розміри.

Всього було розглянуто п'ять експериментів. Найбільш цікавими з них є два. Перший проводився 6.09.89 на полігоні Капустин Яр, висота - 169 км. Другий - з борту науково-дослідного корабля у Карибській затоці, висота інжекції 225 км. Динаміка стратифікації в цих двох експериментах наведена на малюнку 3, де на осі розмірів відлік іде від точки інжекції.



Малюнок 3. Динаміка розвитку стратифікації

Для кожного експерименту чорними прямокутниками схематично показані положення страт. Їх розміри відповідають розмірам страт упоперек магнітного поля. Згідно аналізу, найбільший розмір страт, що спостерігався у першому експерименті, становив 3 км, у другому -5 км.

Середні значення - відповідно 0.5 км та 1.5 км. Максимальна кількість страт досягала 20 в обох експериментах. В обох експериментах після початку відокремлення страт задня частина іонної хмари гальмувалась, передня - збільшувала швидкість приблизно удвічі. Найбільшою відмінністю експериментів є те, що у першому стратифікація спостерігалась спереду хмари, а у другому - позаду відносно напряму дрейфу.

При побудові моделі, що описує стратифікацію ми врахували наступне. По-перше, ми включили ефект інерції іонів. По друге, врахували дифузію (оскільки характерний час дифузії іонів в страті $t_{Di} \sim d_\perp^2 / 4D_i$ може досягати сотень секунд, що співпадає з характерним часом стратифікації).

Кінцева система рівнянь моделі мала вигляд:

$$\frac{1}{e}\hat{\sigma}_{\perp i}(\bar{\nabla}_\perp \phi - \bar{E}_{0\perp}) + D_{i\perp}\nabla_\perp^2 n + \frac{1}{e}\frac{\partial}{\partial z}\sigma_{ei}\frac{\partial \Phi}{\partial z} -$$

$$D_{ei\parallel}\frac{\partial^2 n}{\partial z^2} - \frac{1}{c}\bar{\nabla}\hat{C}_i(\bar{v}_D\bar{\nabla})(\bar{\nabla}_\perp \phi + \frac{T_\perp}{en}\bar{\nabla}_\perp n) = 0$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{c}{H}(\bar{E}_{0\perp} - \bar{\nabla}_\perp \phi) \times \bar{e}_z \cdot \bar{\nabla}_\perp n + D_{i\perp}\nabla_\perp^2 n + \frac{1}{e}\frac{\partial}{\partial z}\sigma_{ei}\frac{\partial \Phi}{\partial z} -$$

$$D_{ei\parallel}\frac{\partial^2 n}{\partial z^2} - \frac{1}{e}\bar{\nabla}\hat{C}_i(\bar{v}_D\bar{\nabla})(\bar{\nabla}_\perp \phi + \frac{T_\perp}{en}\bar{\nabla}_\perp n) = 0$$

де $\bar{v}_D$ - швидкість дрейфу, $\hat{\sigma}$ і $\hat{D}$ - тензори провідності і дифузії, компоненти $\hat{C}_i$: $C_{ij} = 0$, $C_{\perp i} = -\frac{\sigma_{Hi}}{\Omega_i}$, $C_{Hi} = -\frac{\nu_i}{\Omega_i^2}\sigma_{\perp i}$, де Ω_i - циклотронна частота іонів, ν_i - частота зіткнень іонів з іншими частинками. Система описує поведінку штучної плазмової хмари, що рухається у перехресних електричному і магнітному полях зі швидкістю $\bar{v}_D$ і може бути використана для вивчення явища стратифікації.

Було проведено чисельний експеримент для обох інжекцій. Параметри вибиралися згідно з іоносферними умовами. Реально відрізнялися початкові розміри іонної хмари упоперек геомагнітного поля - 2 км для першого експерименту та 6 км для другого. У першому випадку спостерігалося відокремлення страт спереду, а у другому - позаду хмари (по відношенню до напряму дрейфу), як це і мало місце в реальних експериментах. Модель дуже добре передбачає час початку розвитку стратифікації, швидкість руху страт і іонної хмари.

Таким чином, розроблена модель адекватно описує процес стратифікації і може бути використана для моделювання інших експериментів по ракетній інжекції плазми.

У главі 3 розглянуто збурення, що виникають на поверхні плазмових хмар. Ці явища досить часто спостерігались у різних експериментах. В окремих випадках вони мають великомасштабний характер, який визначає весь зовнішній вигляд хмари, в інших це дрібномасштабна зміна його локальних частин. Зазначимо, що у главі обговорювалися тільки явища, при яких хмара все ж лишалась одним цілим.

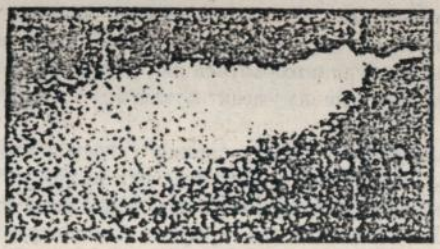
Ці явища цікаві тим, що їх розвиток у значній мірі залежить від параметрів оточуючого середовища і вони можуть виступати добрим інструментом для визначення стану іоносфери. Ми розглянули два випадки таких збурень - поверхневу стратифікацію у експериментах CRRES G-9 та G-11a і великомасштабне квазіперіодичне збурення у експерименті CRRES G-11a.

Ми показали, що поверхнева стратифікація (формування декількох просторових пелюсток неоднорідностей концентрації) може бути пояснена нестійкістю Релея-Тейлора, яка виникає на границі розділу плазмова хмара-іоносфера з врахуванням ефективної сили тяжіння та провідності плазми. Вперше був отриманий простий аналітичний вираз для інкременту розвитку цієї нестійкості: $\gamma = \sqrt{pgk} - \frac{ck^2 \nu_e}{4\pi\omega_{pe}}$, де $p = \frac{\rho_c - \rho_b}{\rho_c + \rho_b}$, ρ_c, ρ_b - іонні густини хмари та іоносфери, $\bar{g}$ - прискорення вільного падіння, $\bar{k}$ - хвильовий вектор, ω_{pe}, ν_e - ленгмюрівська частота електронів та частота зіткнень електронів з іншими частинками. Ми отримали характерний просторовий масштаб розвитку нестійкості: $\Lambda \approx \frac{2\pi}{\omega_{pe}} \sqrt[3]{\frac{c\nu_e^2}{pg\omega_{pe}}}$. Цікаво, що просторовий масштаб Λ явно не залежить від магнітного поля і мало залежить від p, тобто на різних стадіях еволюції хмари Λ змінюється мало, що веде до більш виразного прояву поверхневої стратифікації.

Вибираючи для оцінки параметри іоносфери у випадку експериментів CRRES, ми отримали $\Lambda \sim 1 \div 2$ км, що добре збігається з величинами, які спостерігались. Таким чином, запропонована модель на основі нестійкості Релея-Тейлора добре пояснює розвиток поверхневої стратифікації.

Іншим прикладом є великомасштабне збурення у експерименті G-11a. Під час розвитку цієї штучної плазмової хмари спостерігався

розвиток хвилеподібної деформації бокових поверхонь витягнутих вздовж магнітного поля іонного шару (Мал. 4).



Малюнок 4. Хвилеподібне збурення "дракон" у експерименті CRRES G-11a.

Це збурення виникло вже на першій хвилині після інжекції, а з 5 по 22 хвилину реєструвалися 3 максимуми хвилі з характерною відстанню між ними - 10-14 км, амплітуда сягала 4 км. Цікаво, що у експерименті CRRES G-11b, який проводився у східних умовах, ніякого подібного збурення не спостерігалось.

Як показали проведені нами оцінки, концентрація іонів барію у хмарі була значно меншою концентрації іонів іоносфери. Тобто, еволюція іонної хмари цілком визначалась умовами іоносфери, а сама хмара була трасером її стану. Ми показали, що подібне збурення може бути пояснено квазіперіодичним збуренням електричного поля іоносфери, які неодноразово реєструвались. Постійна складова електричного поля була оцінена з швидкісті дрейфу хмари - 2 мВ/м. У цьому випадку досить наявності збурення з напруженістю 0.2 мВ/м, щоб за час еволюції хмари збурення її поверхні досягло масштабів, що спостерігались. Необхідно відзначити, що для умов іоносфери на висоті 400-500 км необхідна наявність постійної складової поля не менш за 0.5-1 мВ/м, щоб таке явище мало місце. У випадку експерименту G-11b, де поверхневі хвилі не спостерігались, електричне поле було в 4 рази менше, ніж у експерименті CRRES G-11a.

Основні результати і висновки

1. Явище відокремлення іонних філамент, що спостерігалось у експерименті CRRES G-9 пояснено за допомогою розробленої моделі неоднорідної іонізації. Згідно проведенному моделюванню необхідно щоб загальна кількість інжектованих атомів перевищувала деяке критичне значення, яке ми оцінили як 10^{25} атомів.

2. Запропонована універсальна тривимірна модель релаксації штучної плазмової хмари, інжектованної з борту штучного супутника. Модель враховує кінцевість довжини хмари вздовж геомагнітного поля, неоднорідність іоносфери та інші ефекти. Проведений чисельний експеримент дозволив точно описати динаміку хмар в експериментах CRRES. Модель може бути використана для дослідження широкого класу експериментів по інжекції штучних плазмових хмар з орбітальними швидкостями.

3. Для адекватного опису явища стратифікації у ракетних експериментах була запропонована модель, яка враховує інерцію іонів та їх дифузію. Модель була протестована для умов ряду експериментів по інжекції барію. В залежності від профілю концентрації в чисельному експерименті відбувалося відокремлення страт позаду (відносно напряму дрейфу) або спереду іонної хмари, як це і спостерігалося у реальних експериментах. Модель дуже добре прогнозує час початку стратифікації, швидкість страт що відокремлюються, поведінку іонної хмари після початку стратифікації.

4. Поверхнева стратифікація штучних плазмових хмар в експериментах CRRES була пояснена за допомогою нестійкості Релея-Тейлора з врахуванням кінцевості провідності плазми.

Основні положення дисертації опубліковані в таких роботах:

1. Зайцев С.П., Коцаренко Н.Я., Милиневский Г.П. О поверхностной стратификации искусственных плазменных облаков в ионосфере. // Космические исследования. - 1995. - 33, № 3. - с. 243-247.

2. Milinevsky G.P., Evtushevsky A.M., Zaitsev S.N., Stenback-Nielsen H.C., Kashirin A.I. The ion clouds in CRESS Caribbean barium releases campaign as tracers of ionospheric processes. Proceedings Europto Series. // SPIE. - 1994. - p. 2050 -2055.

3. Milinevsky G.P., Evtushevsky A.M, Zaitsev S.N., Romanovsky Yu.A. Peculiarities of cloud dynamics in the CRRES Caribbean releases in the ionosphere. // Геомагнетизм и Аэрономия. - 1994.- 7, № 5. - с. 177-182.

4. Zaitsev S.N., Milinevsky G.P., Evtushevsky A.M. Simulation of initial evolution in the CRRES G9 barium release in the ionosphere. // JATP. - 1995, in press.

5. Zaitsev S.N., Milinevsky G.P., Evtushevsky A.M. The 3-D simulation of the initial ion cloud filamentation observed in the CRRES barium releases. // Annales Geophysicae. - 1996, in press.

6. Milinevsky G.P, Evtushevsky A.M., Kravchenko V.A., Gritsay Z.I, Zaitsev S.N. and Romanovsky Yu.A. The CRRES Caribbean barium releases observed close to magnetic zenith. // "Физика космической плазмы / Сборник трудов международного семинара, 6-10 июня 1993 г., Киев. - Киев: 1994. - с.108-116.

7. Грицай З.И., Евтушевский А.М., Милиневский Г.П., Зайцев С.Н., Каширин А.И., Романовский Ю.А. Динамика филаментации бариевых ионных облаков в ионосфере. // "Физика космической плазмы / Сборник трудов международного семинара, 6-10 июня 1993 г., Киев. - Киев: 1994. - с.117-125.
8. Kotsarenko N.Ya., Milinevsky G.P., Zaitsev S.N. On surface stratification of artificial plasma clouds in ionosphere. // "Physics in Ukraine" /Proc. Int. Confer., Sec. "Plasma Physics" ,Kiev, June 22-27, 1993. - p. 143-146.
9. Зайцев С.Н., Кроль В.А. Моделирование динамики и эволюции техногенных частиц в солнечной системе. // Препринт ИТФ-92-18Р Института теоретической физики АН Украины. - 1992.

Зайцев С.Н. Моделирование динамики плазменных образований в ионосфере Земли (рукопись).

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук по специальности 01.04.02 - теоретическая физика, 01.03.02 - астрофизика. Киевский университет им. Тараса Шевченко, Киев 1996. Защищаются результаты, часть из которых опубликована в 9 научных работах. В диссертации предложен ряд моделей, описывающих динамику и эволюцию искусственных плазменных облаков. Проведен анализ ряда экспериментов по инжекции плазмы в ионосферу. Исследованы явления поверхностной и объемной стратификации бариевых облаков.

S.N.Zaitsev Modeling of dynamics of artificial plasma formation in the ionosphere (manuscript).

The dissertation is advanced at Tarasa Shevchenka Kiev national university for the degree of Candidate of Science (Physics and Mathematics) on the specialties 01.04.02 - theoretical physics, 01.03.02 - astrophysics. Main results of the work have been published in nine scientific works. The models describing the dynamics and evolution of the artificial plasma cloud are proposed. Analyses of the plasma injection experiment in the ionosphere are carried out. Phenomena of surface and volume stratification are studied.

Ключові слова: іоносфера, штучна плазмова хмара, барій, стратифікація.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Ав 33.778

Підп. до друку 17.01.96р. Формат 60х84/16. Папір офс. друк. офс. Умов. друк. л. 0,93. Умов.фарб.-відб. 0,92. Обл.-вид.л. 0,68. Тираж 60, прим. Зам. 50.

Інститут проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, ДСП, вул.Кржижанівського,3.

Дільниця Сперативної поліграфії
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М.Францевича АН України
252680 Київ 680, ДСП, вул.Кржижанівського,3.