

УДК 550.32

До питання про уповільнення сонячного вітру поблизу Марса

В. Г. Тарасов

Львівський центр Інституту космічних досліджень НАНУ—НКАУ

Надійшла до редакції 10.06.96

Значний ступінь уповільнення сонячного вітру Марсом, що спостерігалось у космічних експериментах, ще не знайшов свого пояснення. Дається перегляд можливих моделей і причин цього явища. Припускається, що найімовірнішим поясненням є вплив критичної швидкості іонізації в моделі екзосфери з розширенням водневої і кисневої корони. Остаточну відповідь на це питання дасть експеримент «Марс-96».

З розвитком фізики космічної плазми, що збагачується даними під час проведення космічних експериментів, все вагомішим стає факт урахування у моделях специфічних властивостей як самого об'єкта досліджень, так і умов та методів проведення експерименту. Щодо взаємодії сонячного вітру (СВ) з довкіллям планети Марс, то встановлені на підставі космічних експериментів («Марс», «Вікінг», «Фобос») дані дозволили визначити та провести уточнення багатьох його фізичних параметрів, у тому числі магнітний момент планети, розмір та склад атмосфери, а також показали високу ймовірність існування власного магнітного поля Марса (Долгинов, 1991; Сопрунюк та ін., 1994), котре, як і поля усіх планет, контролюється плазмою та полями СВ. Встановлено, що структура магнітосфери Марса подібна до земної: обмеженість поля на денному боці і формування протяжного шлейфу на нічному. Моделі магнітного поля Марса, що побудовані на даних експериментів, вказують на можливість ерозії власного магнітного поля планети і прямого контакту СВ з іоносферою при їх взаємодії.

Типова взаємодія, яка має місце між СВ і планетою, визначається її довкіллям, що діє як перепона. У випадку планет із значним власним магнітним полем, таких як Земля, СВ зупиняється відповідною протидією магнітного поля на границі магнітосфери. У випадку Венери та Марса, який, можли-

во, має слабке власне магнітне поле (а Венера — не має його взагалі), СВ взаємодіє безпосередньо з незахищеною іоносферою і тоді можливими стають різні ситуації. При таких типах взаємодії іонізація та поглинання екзосферичних іонів може зробити процес масопереносу подібним до ефектів, що спостерігаються біля комет.

Характерним для марсіанських експериментів є спостереження уповільнення СВ у довкіллі планети. Саме тут виникають проблеми з визначенням масопереносних ефектів, які можна оцінювати за вимірами коливань та хвиль у плазмі (Сопрунюк та ін., 1994) і яким надається різна фізична інтерпретація, часом суперечна. Деякі дослідники (Verigin et al., 1991), пов'язують цей факт уповільнення СВ з масопереносом (дисипацією) екзосферичного кисню. Інші (Ip, 1988; Ip, 1992) вважають цю причину малоімовірною, бо при цьому густина екзосферичного нейтрального кисню була б у п'ять разів вищою, ніж очікувана згідно з теоретичною моделлю, навіть при умові максимуму сонячної активності.

Уповільнення СВ може спричинитися обміном енергії між протонами СВ, що надходять до ударної хвилі і відбиваються від неї. Такі протитотоки протонів є характерною рисою планетних ударних хвиль. Відмінністю марсіанської ударної хвилі є те, що потік зворотних протонів аномально високий — більше 30 % при типовому значенні 1 %. Вва-

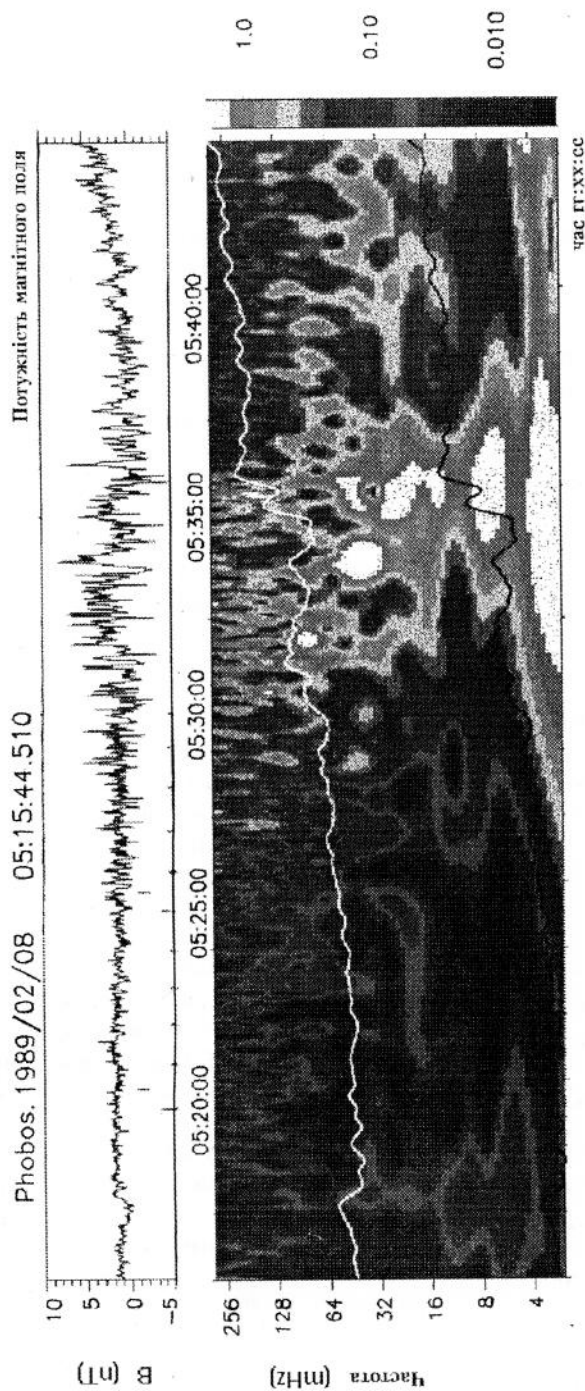


Рис. 1. Аналіз методом хвильових послідовностей сигналу, виміряного під час підходу й перетину ударного фронту 08.02.89 р. в 05:36:00. Біла лінія відповідає гірчастоті протонів

жається (Pr, 1992), що ці протипотоки, породжені дифузією атомарного водню з нижніх шарів Марса у його екзосферу, і є додатковим джерелом висипання популяції відбитих протонів. На сьогодні проблема аномально високого протипотоку протонів залишається для марсіанської ударної хвилі невизначеною.

Роль сутичкової іонізації також невизначена, а густина нейтральних атомів у верхньовисотній іонопаузі недостатня для ефекту фотоіонізації. Можна сподіватися на альвенівський ефект критичної швидкості іонізації, при якому ця швидкість відіграє вирішальну роль у взаємодії комет з СВ (можливість зрівноваження магнітних полів СВ планетарною іоносферною плазмою) (Haerendel, 1986). Якщо припустити, що Марс не має власного магнітного поля, а СВ взаємодіє безпосередньо з іоносферою Марса, то побудова такої моделі плазмових потоків екзосфери дозволить визначити критерій для появи критичної швидкості іонізації. Цей критерій включає емпіричні умови Бреннінга щодо швидкості поперечних потоку потоків (що повинна бути вищою за альвенівську швидкість іонізації і не перебільшувати локальну магнітозвукову швидкість) та умови Таунсена, згідно з якими інтегрована ймовірність ударної іонізації гарячими електронами повинна бути більшою за одиницю вздовж потоку плазми. Мета цього дослідження — вивчити нові можливі джерела іонізації нейтральних атомів у водневій та кисневій короні Марса. Дійсно, дисоціативна рекомбінація основного іоносферного іона O_2^+ ($O_2^+ + e \rightarrow O + O + 2.5 \text{ eV}$) у нижній екзосфері Марса ($h_c \approx 200 \text{ км}$) приводить до утворення швидких кисневих атомів суттєво більшою енергією, ніж теплова енергія відповідної екзосфери. Балістичний рух таких надтеплових кисневих атомів може привести до утворення кисневої корони, що розширюється. У цій моделі уповільнення СВ здійснюється за рахунок ударної іонізації як основного джерела «новонароджених» іонів (Pr, 1988). При цьому в результаті масопереносу зменшення швидкості СВ повинно бути порядку $\Delta V < 10 \text{ км/с}$. В той же час спостережена швидкість уповільнення СВ оцінювалась значенням приблизно 100 км/с (Verigin et al., 1991), що в 10 разів більшою, і, таким чином, вищезгадана ударна іонізація не пояснює механізм такого уповільнення. Це знову скиляє до гіпотези про критичну швидкість іонізації, що може змінити ситуацію на краще. Врахування розширення кисневої екзосфери робить умову Таунсена критичної швидкості іонізації, котра дуже обмежує умови застосування моделі динаміки газового потоку і моделі планетної екзосфери (Luhmann, Russel, 1990), менш жорст-

кою. Наступне вдосконалення моделі вимагає перевірки цього критерію щодо водневої і кисневої екзосфери Марса. Вивчення планетоцентричного розподілу важких іонів з борту КА «Марс-96» буде використано для верифікації цієї моделі.

Другою особливістю процесів у марсіанській ударній хвилі є високий рівень гідромагнітної турбулентності, що в умовах безсутичкової плазми означає взаємодію СВ з популяцією «новонароджених» іонів і може пояснити аномально швидку дисипацію енергії СВ на фронті ударної хвилі. Якщо у турбулентності існує суттєвий вплив компресійних (магнітозвукових) хвильових компонентів, то можливим є процес прискорення Фермі другого роду (Terasawa, 1989). У такому процесі іони прискорюються протипотоковими хвильовими компонентами. Енергійні іони підсилюють популяцію протипотокових іонів і роблять область уповільнення СВ сильно асиметричною (Dubinin et al., 1995). Ця картина взаємодії СВ з довкіллям Марса підтверджується в загальному аналізі даних вимірювання магнітних полів в експерименті «Фобос».

На рис. 1 подані результати аналізу методом хвильових послідовностей (wavelet) енергії магнітного поля, виміряного при підході КА «Фобос» до ударного фронту Марса. На цій частині орбіти КА був магнітно пов'язаний з ударним фронтом. Згідно з моделлю Дубиніна це означає, що КА перетинає регіон з дуже уповільненим СВ. Можна побачити високий рівень турбулентності магнітного поля на частотах вищих і нижчих гірчастоти протонів і O^+ . Знайдені пакети коротких коливань дозволяють ідентифікувати їх як компресійні альвенівські хвилі. Такі хвилі можуть бути результатом двопотокової нестабільності, що виникає при взаємодії СВ з «новонародженими» іонами.

На рис. 2 показані результати такого ж аналізу енергії магнітного поля для другого випадку підходу КА до ударного фронту. Під час цього підходу КА не був магнітно пов'язаний з ударним фронтом. Тут нема таких значних флюктуацій магнітного поля у висхідній ділянці, хоча збільшення амплітуди флюктуацій визначається більш крутим фронтом під час перетину ударного фронту і значно меншим відносним зростанням величини. Порівняння цих двох рисунків демонструє характерну асиметрію процесу масопереносу.

Відсутність (або квазівідсутність для Марса) суттєвого власного магнітного поля робить взаємодію СВ з Марсом і Венерою дуже подібними. Природно шукати загальні риси у докільлі цих двох планет. Одною з цілей наступного експерименту «Марс-96» буде вияв можливості утворення «потоків ліній»

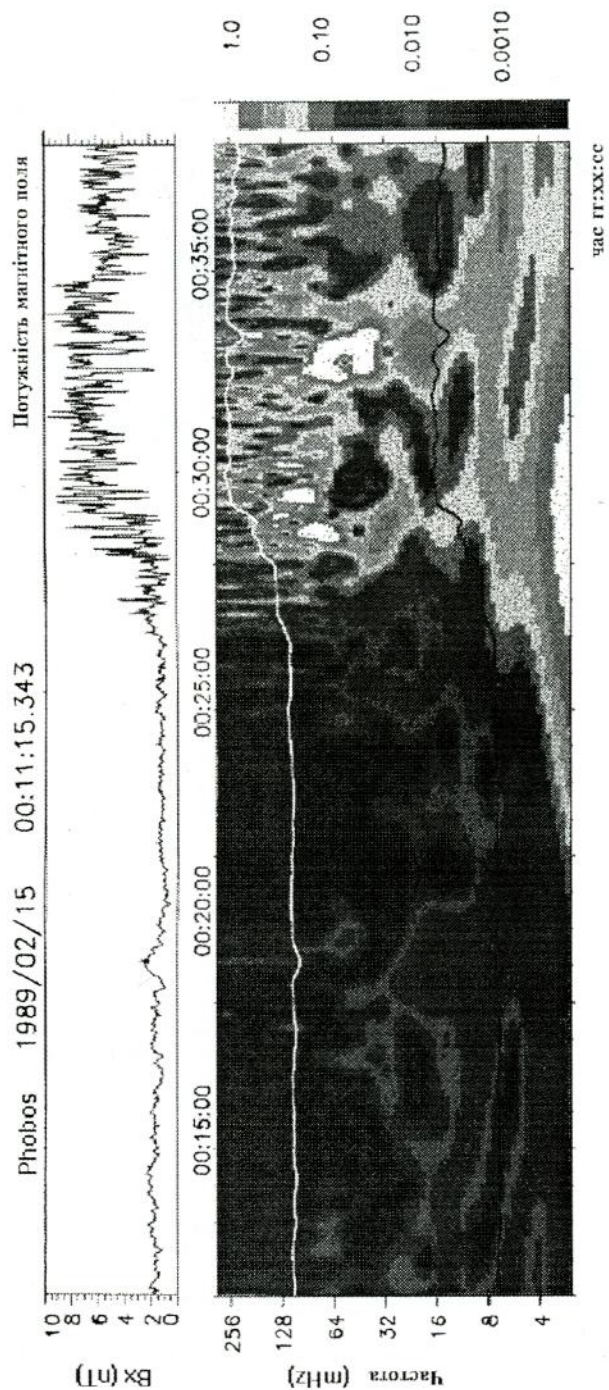


Рис. 2. Аналіз методом хвильових послідовностей сигналу, виміряного під час підходу й перетину ударного фронту 15.02.89 р. в 00:29:00. Біла лінія відповідає гірчастоті протонів

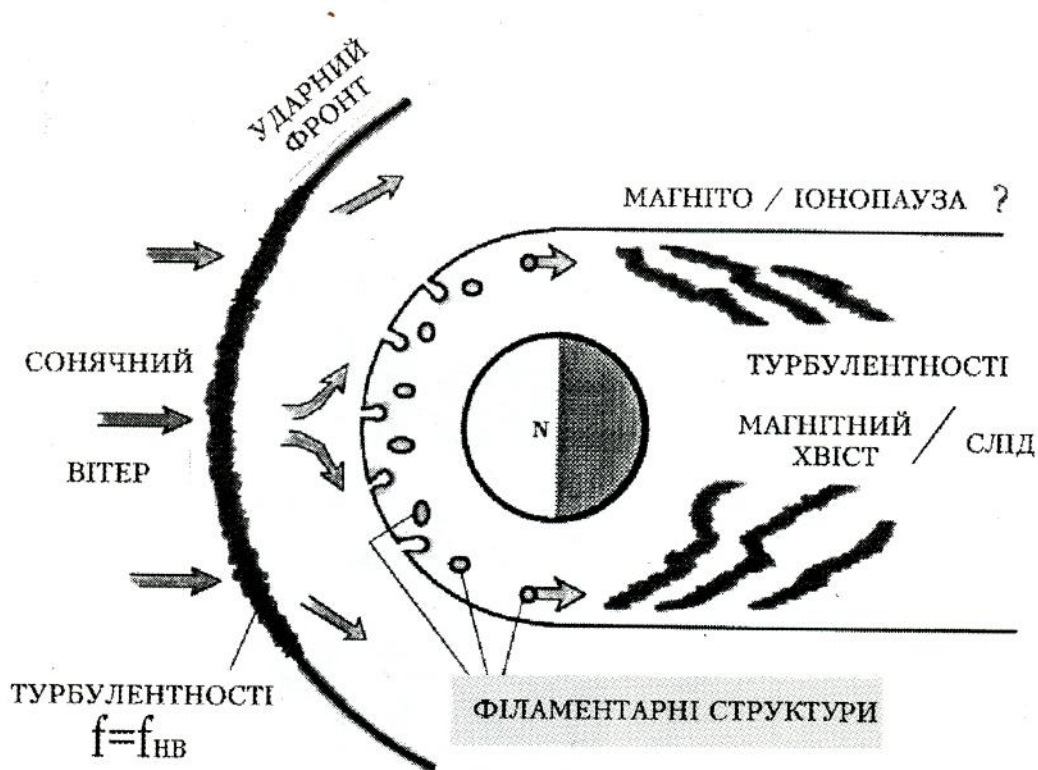


Рис. 3. Основна схема формування й розвитку силових ліній

у марсіанській іоносфері. В іоносфері Венери магнітні потокові лінії спостерігались під час експерименту «Піонер» (Elphic, Russell, 1983). Вони були виявлені в іоносфері, що звичайно екранується від зовнішнього міжпланетного магнітного поля потоками струмів у іонопаузі, які відхиляють ці магнітні поля. Рівень цих збурень в іонопаузі іноді був вищим, ніж величина зовнішнього магнітного поля.

На рис. 3 подана загальна схема формування і розвитку поточкових ліній у доквіллі Марса. Питання про механізм уповільнення СВ, структуру та розміри екзосфери, існування поточкових ліній у марсіанській іоносфері будуть вирішуватися у проєкті «Марс-96». Плазмовий експеримент ELISMA в цьому проєкті спеціально призначається для вивчення взаємодії СВ з Марсом.

Долгинов Ш. Ш. Магнитное поле и магнитосфера планеты Марс // Косм. исслед.—1991.—29, вып. 5.—С. 754—789.

Сопрунок П. М., Климов С. И., Корепанов В. Е. Электрические поля в космической плазме. — Киев: Наук. думка, 1994.—191 с.

Dubinin E., Obod D., Lundin R., et al. Some features of the martian bow shock // Adv. Space Res.—1995.—15, N 8/9.—P. (8/9)423—(8/9)431.

Elphic R. C., Russell C. T. Magnetic flux ropes in the Venus ionosphere: observations and models // J. Geophys. Res.—

1983.—88.—P. 58—72.

Haerendel G. Plasma flow and critical velocity ionization in cometary coma // Geophys. Res. Lett.—1986.—13, N 3.—P. 255—258.

Ip W.-H. On a not oxygen corona of Mars // Icarus.—1988.—76.—P. 135—145.

Ip W.-H. Neutral particle environment of Mars: The exosphere-plasma interaction effects // Adv. Space Res.—1992.—12, N 9.—P. (9)205—(9)211.

Luhmann J. G. Russell C. T. An assessment of the conditions for critical velocity ionization at the weakly magnetized planets // Adv. Space Res.—1990.—10, N 7.—P. (7)71—(7)76.

Terasawa T. Particle scattering and acceleration in a turbulent plasma about comets. Geophysical Monograph 53, 1989.

Verigin M. I., Gringauz K. I., Kotova G. A., et al. On the problem of the Martian atmosphere dissipation: Phobos-2 TAUS spectrometer results // J. Geophys. Res.—1991.—96.—P. 19315—19329.

ON THE PROBLEM OF SOLAR WIND DECELERATION NEAR MARS

V. H. Tarasov

A considerable rate of solar wind deceleration near Mars observed in space experiments has not been explained yet. A short review of possible models and origin of this phenomenon is presented. It is assumed that the most trustworthy explanation is the effect of critical ionization rate in the exosphere model with an extended oxygen and hydrogen corona. The ultimate answer to this question will be given by the “Mars-96” experiment.