



ISSN 1607–2855

Том 4 · № 2 · 2003 С. 72–76

УДК 523.4

Кутовий розподіл параметрів сонячного вітру

В.М. Решетник

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Наявні на наш час бази даних про стан міжпланетного середовища поблизу орбіти Землі та в більш глибокому космосі дозволяють провести статистичний аналіз розподілу параметрів сонячного вітру. Підтверджена спіральна структура міжпланетного магнітного поля (ММП). Показано, що розподіл середнього значення повної індукції ММП не є ізотропним. Коли вектор магнітного поля лежить близько до напрямку лінії Земля–Сонце, то індукція є мінімальною, а максимальних значень вона досягає, коли вектор ММП перпендикулярний напрямку Сонце–Земля. Подібний аналіз було проведено для різних фаз сонячного циклу та геліоцентричних відстаней. Також отримано просторовий розподіл для вектора швидкості сонячної плазми в міжпланетному середовищі. Виявлено, що в середньому швидкість сонячного вітру змінюється в залежності від напрямку вектора швидкості розповсюдження сонячного вітру.

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, Решетник В.М. — Имеющиеся в наше время базы данных о состоянии межпланетной среды вблизи орбиты Земли и в более глубоком космосе позволяют провести статистический анализ распределения параметров солнечного ветра. Подтверждается спиральная структура межпланетного магнитного поля (ММП). Показано, что распределение среднего значения полной индукции ММП не является изотропным. Когда вектор магнитного поля лежит вблизи направления линии Земля–Солнце, то индукция минимальна, а максимальных значений она достигает, когда вектор ММП перпендикулярен направлению Солнце–Земля. Подобный анализ был проведен для разных фаз солнечного цикла и гелиоцентрических расстояний. Также получено пространственное распределение для вектора скорости солнечной плазмы в межпланетной среде. Обнаружено, что в среднем скорость солнечного ветра изменяется в зависимости от направления вектора скорости распространения солнечного ветра.

ANGULAR DISTRIBUTION OF SOLAR WIND PARAMETERS, by Reshetnik V.M. — Available databases containing data about the state of interstellar medium close to the Earth's orbit allows to carry out statistical analysis of the solar wind parameters distribution. Spiral structure of the interplanetary magnetic field (IMP) is confirmed. Distribution of the mean value of complete induction of the IMP is shown to be anisotropic. Induction is minimal when the vector of the IMP is close to the line "Earth–Sun", but it reaches maximum when the vector is perpendicular to the line "Earth–Sun". Such analysis was carried out for different phases of the solar cycle and different heliocentric distances. Spatial distribution of the solar plasma velocity vector is obtained too. Velocity of the solar wind varies depending on the direction of the solar wind velocity vector.

1. ВСТУП

Міжпланетний простір заповнений сонячною плазмою, що поширюється від Сонця. Найпростіші моделі сонячного вітру були побудовані ще в п'ятидесятих роках минулого століття [2, 6]. Ці моделі, не зважаючи на їх простоту, досить добре описували фізичні процеси в міжпланетному середовищі. Так згідно з паркерівською моделлю, силові лінії міжпланетного магнітного поля (ММП) мають форму спіралі, закрученої проти напрямку обертання Сонця. На орбіті Землі нахил такої спіралі досягає приблизно 45° . Наступні космічні дослідження підтвердили в середньому справедливості теорії Паркера. Але міжпланетне середовище постійно змінюється, воно заповнене утвореннями, які за своїми характеристиками значно відрізняються від середніх значень. Тому вивченню збурень в міжпланетному середовищі приділяється багато уваги як зі сторони наукового загалу, так і простої громадськості.

2. ДАНІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ І ОБРОБКА

У роботі використана інформація про стан міжпланетного поля поблизу Землі з бази даних OMNI (web-адреса <http://dbserv.npi.msu.su/data/release2/omnionline.html>) з 1963 по 2001 рік. Компоненти ММП обчислювались зі спостережень КА серій IMP, HEOS, VELA, OGO та ISEE і представлені в системі GSE. Вісь X спрямована вздовж лінії Земля Сонце, вісь Z перпендикулярна площині екліптики, вісь Y замикає праву трійку і лежить в площині екліптики. Використовувались щогодинні показники стану сонячного вітру. Всього база даних включає в себе біля 300 тисяч параметрів сонячного вітру поблизу орбіти Землі. Для представлення результатів вимірів Voyager 2, використовувалась геліоцентрична система, де вісь X спрямована з центра Сонця в точку де знаходиться Земля на момент початку року, вісь Z перпендикулярна екліптиці, вісь Y замикає праву трійку векторів.

Результати представлені двома різними способами: використанням декартової та полярної системи координат. На полярних діаграмах, деякий параметр середовища p , ставився у відповідність

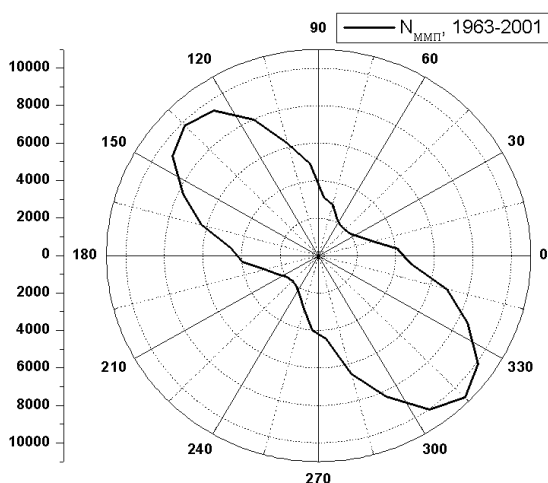


Рис. 1. Розподіл числа використаних вимірів B_{xy} ММП за напрямками за період 1965–2001

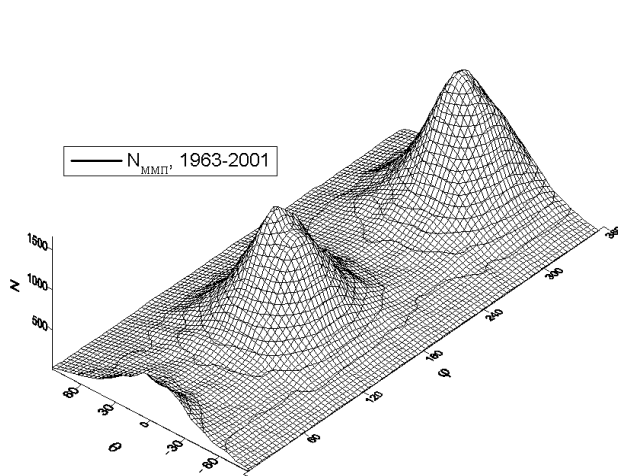


Рис. 2. Просторовий розподіл кількості спостережень ММП за період 1965–2001

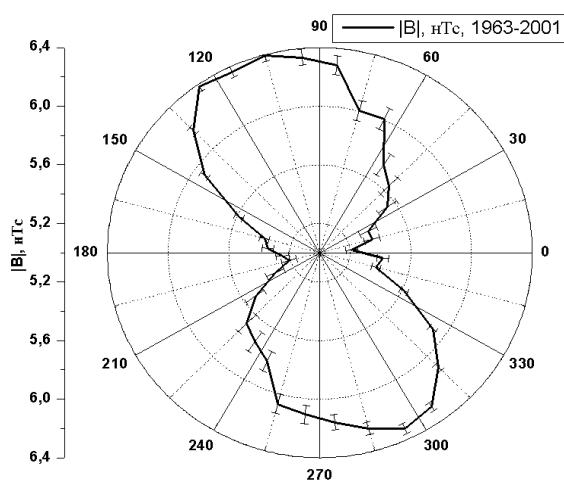


Рис. 3. Розподіл середньої індукції B_{xy} ММП в залежності від його напрямку φ за період 1965–2001

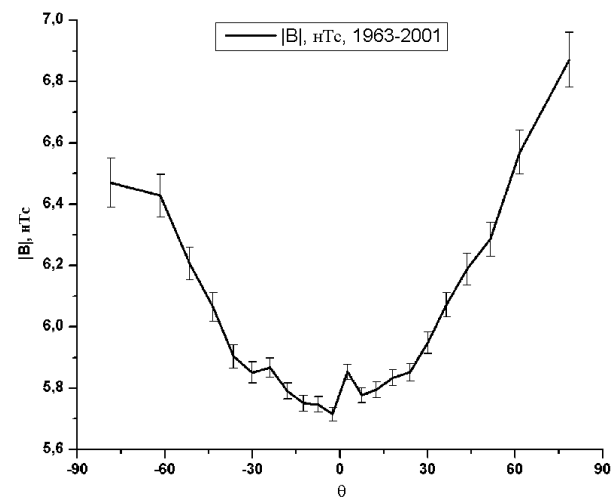


Рис. 4. Середня індукція ММП в залежності від кута нахилу до площини екліптики за період 1965–2001

азимутальному куту вектора ММП φ на момент спостереження даного параметра p і усереднювався в межах 10-градусних секторів, на які розбивався повний набір напрямів φ . Результат представлявся на полярній діаграмі $\langle p \rangle(\varphi)$. Азимутальний кут φ відраховувався від напрямку на Сонце проти годинникової стрілки в площині ХУ (вид з півночі). Шкала величин вказана біля кожного графіка зліва. Нуль пункт радіальної координати ($\langle p \rangle$) зміщений так, щоб рельєфніше виділити варіації вибраного параметру. Довірчий інтервал ($\pm\sigma$) вказаний на графіках.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1 видно тенденцію вектора індукції \mathbf{B}_{xy} міжпланетного магнітного поля до групування у двох напрямках (з азимутальними кутами $\varphi \cong 135^\circ$ та $\varphi \cong 315^\circ$), тобто до збереження, в середньому, спіральної структури, що повністю відповідає теорії Паркера. Просторовий розподіл напрямків ММП представлений на рис. 2, де θ — кут відхилення від площини ХУ, додатній в північну сторону. Можна помітити, що вектори індукції міжпланетного поля групуються у двох переважаючих

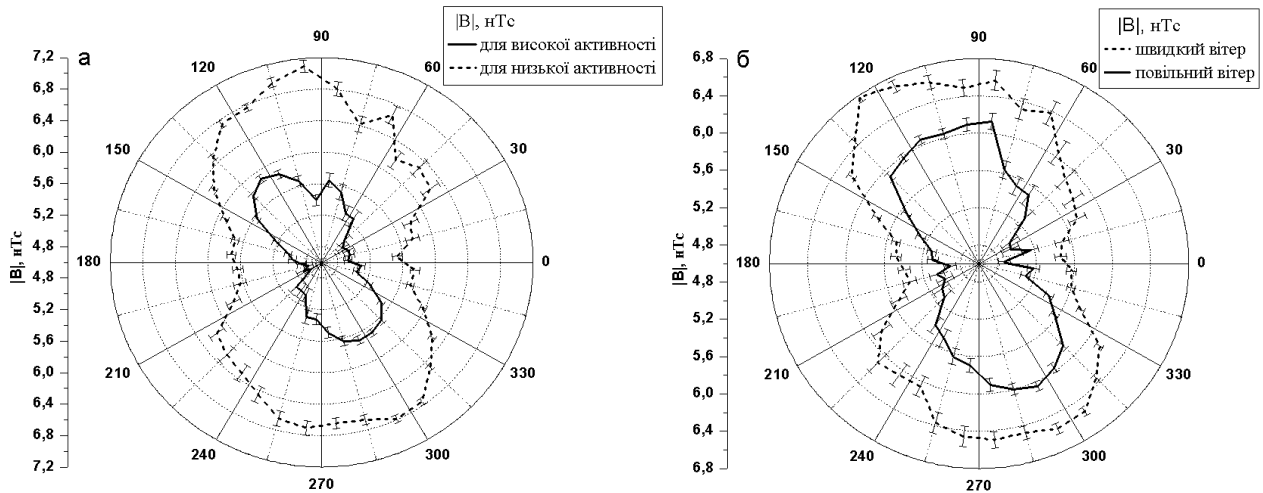


Рис. 5. Індукція ММП для різних (а) періодів сонячної активності та (б) швидкостей сонячного вітру в залежності від його азимутального напрямку φ

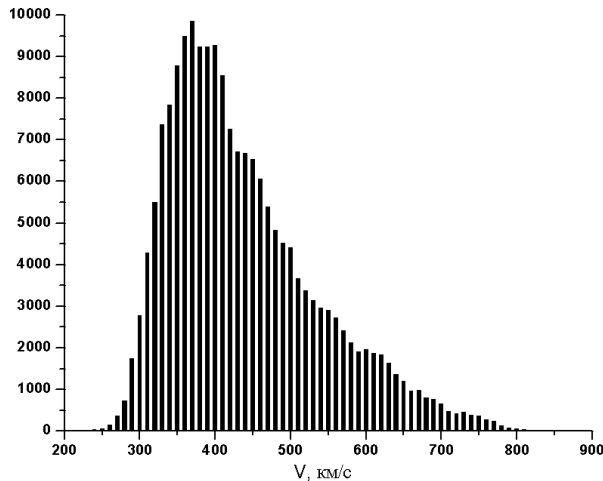


Рис. 6. Гістограма швидкостей сонячного вітру за період з 1963 по 2001 роки

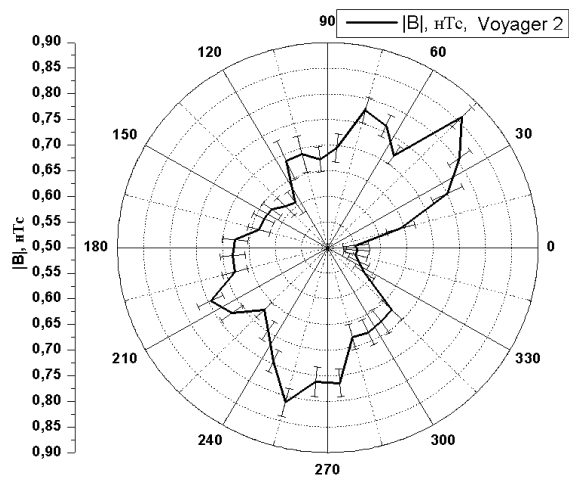


Рис. 7. Розподіл середньої індукції B_{xy} ММП в залежності від його напрямку φ за даними КА Voyager 2

напрямах. Подібний результат при аналізі справедливості теорії Паркера, був отриманий Веселовським [1].

На рис. 3 наведено зв'язок модуля середньої індукції ММП і його напрямку в просторі. Добре помітна асиметрія. Коли вектор магнітного поля лежить близько до напрямку лінії Земля–Сонце, то напруженість є мінімальною, а максимальних значень вона досягає, коли вектор ММП перпендикулярний напрямку Сонце–Земля. Ці данні підтверджують більш ранні дослідження [5], де була також отримана асиметрія в значенні напруженості ММП для чотирьох напрямків: Сонце, анти-Сонце і перпендикулярно напрямку Сонце–Земля. Такий ефект, ймовірно, викликаний стисненнями сонячного вітру, пов'язаними з високошвидкісними потоками, в яких магнітне поле частіше має напрямок, нормальний до сонячного радіусу [3]. Цю гіпотезу підтверджують, результати приведені на рис. 4, які показують залежність середньої напруженості ММП від кута між вектором магнітного поля та площиною ХУ.

На рис. 5а наведена залежність середньої індукції ММП від азимутального кута φ для високої

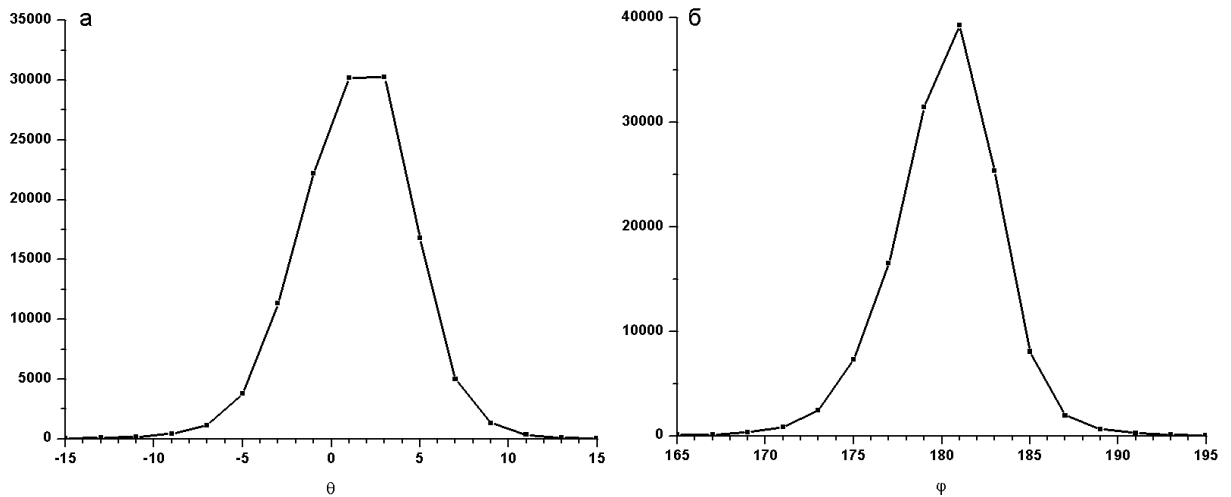


Рис. 8. Розподіл кількості вимірів вектора швидкості сонячного вітру в залежності від (а) кута відхилення від площини екліптики θ та (б) азимутального кута φ

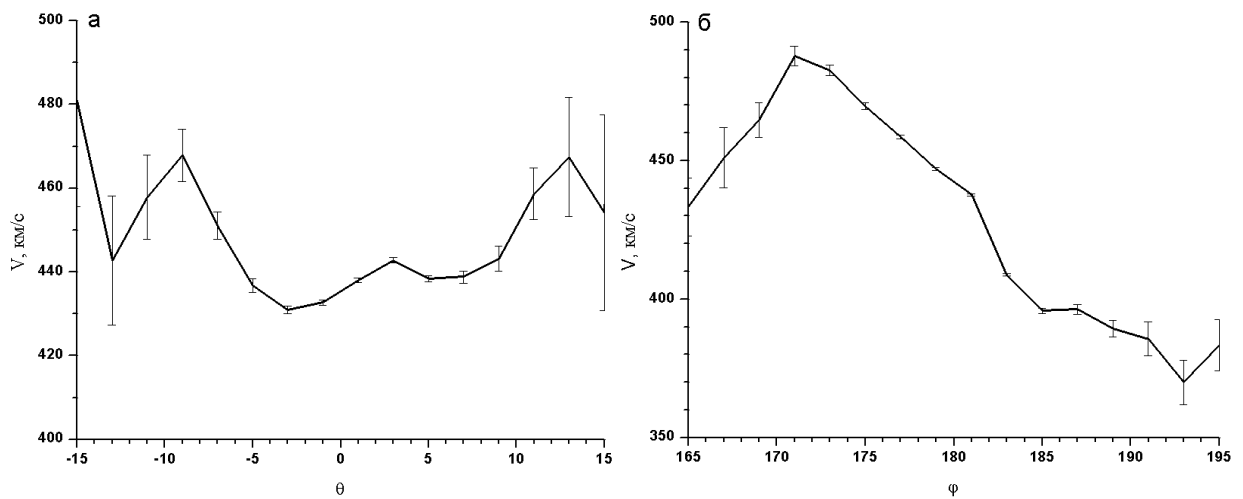


Рис. 9. Розподіл значення вимірів вектора швидкості сонячного вітру в залежності від (а) кута відхилення від площини екліптики θ та (б) азимутального кута φ

та низької сонячної активності, за проаналізований період, який, нагадаємо, складає більше двадцяти років. Під час високої активності Сонця, середня індукція ММП зростає більше ніж на 1 нТл у порівнянні з аналогічною в періоди низької активності, незалежно від напрямку міжпланетного поля. Аналогічний розподіл ММП було отримано для різних швидкостей сонячного вітру (рис. 5б). Весь масив наявних даних був розбитий на два: перший, коли швидкість вище 400 км/с, та другий, коли швидкість сонячного вітру не перевищує 400 км/с. Отримано, що більш високошвидкісні потоки мають більші значення індукції в заморожених магнітних полів. Також спостерігається, незалежно від швидкості розповсюдження сонячної плазми, асиметрія в розподілі середньої індукції.

Побудовано розподіл сонячного вітру за швидкостями (рис. 6). Чітко помітний максимум біля 370 км/с. Загалом середня арифметична швидкість сонячного вітру складала біля 440 км/с. Отримано також просторовий розподіл вектора розповсюдження сонячного вітру (рис. 8а,б). На рис. 8а приведено розподіл кількості спостережень в залежності від кута θ . На рис. 8б приведено подібний розподіл, але як функція азимутального кута φ . Отриманий результат показує, що сонячний вітер розповсюджується не радіально від Сонця, а ніби з деякої точки на відстані біля 1° від центра сонячного диска. Цей ефект можна пояснити наявністю нерадіальної складової швидкості сонячного вітру [4], яка в свою чергу може бути викликана магнітними силами зі сторони замороженого магнітного поля та силами в'язкості самої речовини вітру. Розподіл середньої швидкості сонячної плазми, як функція напрямку вектора сонячного вітру (рис. 9а,б), показує, що швидкість сонячного вітру є вищою, коли він розповсюджується з північної півсфери Сонця. Ще більш явна асиметрія отримана для азимутального розподілу швидкості сонячного вітру. Величина асиметрії досягає майже 100 км/с, що складає біля 25% від значення самої швидкості сонячної плазми поблизу Землі. Слід зауважити, що вищевказані результати отримані на базі даних спостережень біля орбіти Землі за період з 1963 по 2001 роки, що складає трохи більше трьох циклів сонячної активності.

Вдалі місії в глибокому космосі надали унікальну можливість отримання інформації про стан міжпланетного середовища на різних геліоцентричних відстанях. Нами було використані результати вимірювань космічної станції Voyager 2. Поведінка усередненої індукції ММП приведена на рис. 7, який побудований на базі вимірювань Voyager 2 і фактично є усередненням магнітних полів на відстанях з 1 по 30 а.о. за період з 1977 по 1989 роки. Чітко помітна асиметрія графіку, але вона має дещо іншу форму у порівнянні з подібними результатами на орбіті Землі. Це можна пояснити тим, що основний внесок в результат внесли виміри на більших геліоцентричних відстанях, де умови в міжпланетному середовищі можуть дещо відрізнятись від тих, що на орбіті Землі.

4. ВИСНОВКИ

Отримано просторовий розподіл вектора ММП за даними бази OMNI, період 1963–2001. Підтверджена спіральна орієнтація міжпланетного магнітного поля. Встановлено, що величина ММП мінімальна, коли вектор індукції міжпланетного поля лежить в площині екліптики та вздовж напрямку Сонце–Земля. Ці результати не залежать від циклу активності Сонця та швидкості сонячного вітру. Отримано просторовий розподіл для вектора швидкості сонячної плазми в міжпланетному середовищі. Виявлено, що сонячний вітер розповсюджується не радіально від Сонця. Середня швидкість розповсюдження змінюється в залежності від напрямку руху сонячного вітру.

1. Веселовский И.С., Тарсина М.В. Угловое распределение вектора межпланетного магнитного поля // Геомagnetизм и аэрономия. — 2001. — **41**. — Р. 471.
2. Всехсвятский С.К., Никольский Г.М., Пономарев Е.А., Чердниченко В.И. К вопросу о корпускулярном излучении Солнца // Астрон. журнал. — 1955. — **32**. — Р. 165.
3. Коваленко В.А. Солнечный ветер. — М.: Наука, 1983. — 272 с.
4. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976. — 304 с.
5. King J.H. A survey of long-term interplanetary magnetic field variations // J. Geophys. Res. — 1976. — **81**. — Р. 653.
6. Parker E.N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // Astrophys. J. — 1958. — **128**. — Р. 664.

Надійшла до редакції 7.20.2003