

## Синергетичен анализ на природата на слънчево-земните връзки

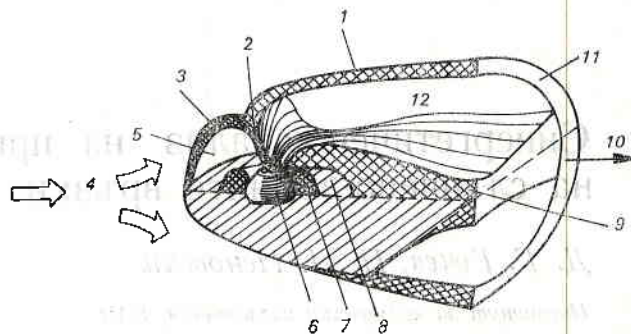
Д. Г. Гочев, П. И. Неновски

*Институт за космически изследвания, БАН*

Теоретичното и експерименталното изучаване на слънчево-земните връзки (СЗВ), освен че представлява научен интерес е и от практическа полза за осъществяване на радиовръзките, за синоптиката, космонавтиката и височинната авиация, биометеорологията и т. н. В системата Слънце—Земя съществуват следните подсистеми: Слънце с активни области; междупланетно пространство; Земя с магнитосфера, йоносфера, атмосфера, хидросфера, литосфера. Първите стъпки в изучаването на СЗВ са свързани с пионерните работи на Чижевски [1] и Вернадски [2] от началото на века. Независимо от успехите в прилагане на статистическите методи [3] и установяване на корелационни връзки между параметрите, характеризиращи слънчевата активност, електромагнитната и/или биологичната активност, тези резултати не допринесоха за качествено ново разбиране и изясняване на природата на СЗВ. Сега се въвеждат полуемпирични параметри, изразяващи конкретни връзки между величини, които характеризират свойствата на някоя от изброените подсистеми. Често тези величини са функции на някакъв общ параметър, който обуславя „високата“ корелативност на полуемпиричните параметри. Във физиката на СЗВ е доказано съществуването на множество корелации — между параметрите на слънчевия вятър и електромагнитната активност, проявяваща се като нискочестотни магнитни вариации; между секторната структура на междупланетното магнитно поле (ММП) и някои климатологични процеси и т. н. Нека подчертаем, че съществуването на обособени подсистеми в системата Слънце—Земя, където процесите в една подсистема в първо приближение са независими от процесите в друга подсистема, не позволява да се моделират СЗВ в термините на обичайните теоретико-математични методи. Например взаимодействието на слънчевия вятър с магнитосферата на Земята се описва с магнитохидродинамични (МХД) уравнения, магнитосферната плазма — с кинетичен метод, взаимодействието ѝ с йоносферата — с едночастично описание, взаимодействието на йоносферата с неутралната атмосфера — с уравнението на Навие—Стокс. Окупняването на системите уравнения чрез въвеждане

на нови членове и връзки води до тежки изчислителни задачи и трудности при определяне на началните и на граничните условия. Някои експериментални резултати са недостатъчни и противоречиви.

От основен интерес е изследването на механизмите на преобразуване и прехвърляне на енергия при слънчеви ерупции към областите на космическото пространство около Земята.



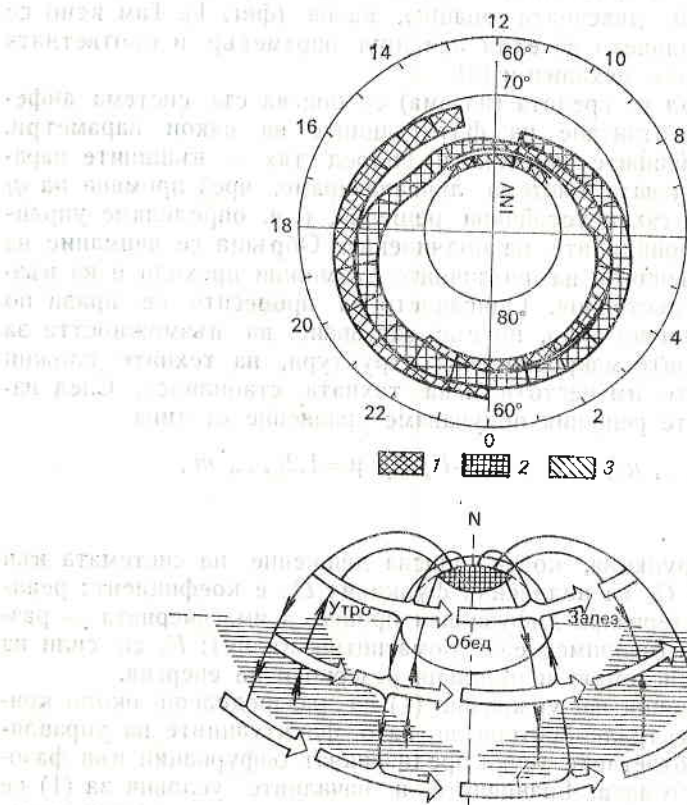
Фиг.1. Структура на магнитосферата на Земята

1 — мантия; 2 — ядро; 3 — граничен слой откъм дневна страна; 4 — слънчев вятър; 5 — външна магнитосфера и радиационен пояс; 6 — овал на полярните сияния; 7 — плазмосфера; 8 — радиационен пояс; 9 — плазмен слой; 10 — опашка на магнитосферата; 11 — нискоширинна гранична област; 12 — високоширинна част на опашката на магнитосферата

В статията е направен опит да се използват нови идеи, които биха помогнали за математическо описание на магнитосферата (фиг. 1). Вниманието е насочено към нея поради това, че тя изпълнява ролята на активен клапан (според досегашните изследвания предимно едностранен), който регулира енергийния поток от Слънцето към Земята. Сумарният ток по челната повърхност на магнитосферата е  $\sim 10^7$  A, пълният ток през плоскостта на полунощния меридиан от височина неколкостотин километра до орбитата на Луната е от същия порядък. Пълният надлъжен ток от магнитосферата в йоносферата при спокойни условия е  $0,7 \cdot 10^8$  A, а при смутени —  $5 \cdot 10^8$  A. Стойността му се определя от концентрирането на структури, които са в динамично равновесие и от възникналите състояния при неговото нарушаване (фиг. 2).

Като са използвани идеи от синергетиката [4], в статията се прави анализ на някои типични и с ключово значение процеси в магнитосферата и тяхното взаимодействие. Отчита се значението на вътрешни за подсистемите параметри — функция на разпределение на частиците, вектор на магнитното поле, спектрално разпределение на електромагнитните вълни, и на външни параметри — компоненти на междупланетното магнитно поле и закона за изменението им, скорост и плътност на слънчевия вятър. Структуриране може да се предизвика и/или измени поради: 1. Увеличаване броя на управляващите параметри, което води до преминаване на системата от една структура в друга при запазване на степента на външно въздействие — за някои части на магнитосферата такова значение има  $u$ -компонентата на  $MMFI (B_p)$ . 2. Съчетаване влиянието на няколко параметъра чрез изменение на принципите на подчинение между тях — например влиянието

на плазмени неустойчивости и на заредени частици върху образуването на двойни слоеве и влиянието на тези слоеве върху конвекцията на плазмата и върху динамиката на крупномасщабния енергообмен [5, 6]. 3. Достигане на



Фиг.2. Токова система в магнитосферата при ниска магнитна активност  $|AL| < 10^{-7}$  T

1 — токове, втичащи в йоносферата; 2 — токове, изтичащи от йоносферата; 3 — токове, чиято полярност се мени в зависимост от ориентацията на магнитното поле; широки стрелки — токов слой, който тече по магнитопаузата от запад на изток; тънки стрелки — токова система по силовите линии на магнитното поле на Земята; надлъжните токове в овала на полярните сияния са представени в инвариантна (INV) координатна система  $\Phi$ -MLT

критична стойност (интервал) на управляващите параметри, при която системата може да премине произволно в едно от няколко възможни състояния. Например такъв параметър е параметърът на Акасофу

$$\varepsilon = V_{sw} B_0^{2/3} \sin^4(\theta/2),$$

където

$$\theta = \begin{cases} \arctg(|B_y/B_z|) & \text{при } B_z > 0, \\ \pi - \arctg(|B_y/B_z|) & \text{при } B_z < 0. \end{cases}$$



Тук  $V_{sw}$  е скоростта на слънчевия вятър;  $B_0$  — големината на магнитното поле на Земята на магнитопаузата;  $B_y, B_z$  са компонентите на междупланетното магнитно поле в слънчева координатна система и  $l$  е разстоянието от Земята до магнитопаузата, измерено по линията Слънце — Земя. Интерес представляват процесите в граничните области — магнитопаузата, нискоширочинния граничен слой, далечната опашка, каспа (фиг. 1). Там ясно се вижда промяната на влиянието на един или друг параметър и съответната смяна на преобладаващите механизми [5].

Предлаганият подход е: средата (плазма) се описва със система диференциални уравнения с отчитане на флукуациите на някои параметри. Първо определяме устойчивите решения и според тях — външните параметри  $q_i, i=1 \div n$ . Получената система линеализираме, чрез промяна на  $q_i$  получаваме за някои от тях неустойчиви решения, т. е. определяме управляващите параметри и принципите на подчинение. Обръща се внимание на критичните точки в решенията, на различните възможни преходи и на възникването на хаотични състояния. Описанието на процесите се прави по възможност на мезоскопично ниво, но със запазване на възможността за изследване на възникналите макроскопични структури, на техните сложни движения, на собствените им честоти и на тяхната стабилност. След изключване на затихващите решения получаваме уравнение от типа

$$(1) \quad -\frac{\partial u_\mu}{\partial t} = G_\mu(\nabla, u_\mu) + D_\mu \nabla^2 u_\mu + F_\mu(t), \quad \mu=1, 2, \dots, m,$$

където

$u_\mu$  характеризира функция, която описва движение на системата във фазовото пространство;  $G_\mu$  са нелинейни функции;  $D_\mu$  е коефициент: реалната му стойност характеризира дифузионен процес, а имагинерната — разпространение на импулс (например електромагнитни вълни);  $F_\mu$  са сили на взаимодействие между системата и външния резервоар на енергия.

Незатихващите решения на уравнение (1) са разпределени около критични точки в тесни спектрални интервали, като флукуациите на управляващите параметри в съответните точки предизвикват бифуркации във фазовата траектория на системата. Граничните и началните условия за (1) се определят от конкретната физическа задача, но съществуват основни принципи, на които те трябва да отговарят:

$$u_\mu(s) = 0; \quad \frac{\partial u_\mu(s)}{\partial s} = 0; \quad u_\mu(x) = u_\mu(x+L); \quad \|u\| \leq C < \infty, \quad x \rightarrow \infty.$$

Задачата съществено се усложнява, ако  $F_\mu$  зависи от  $u_\mu$  [4].

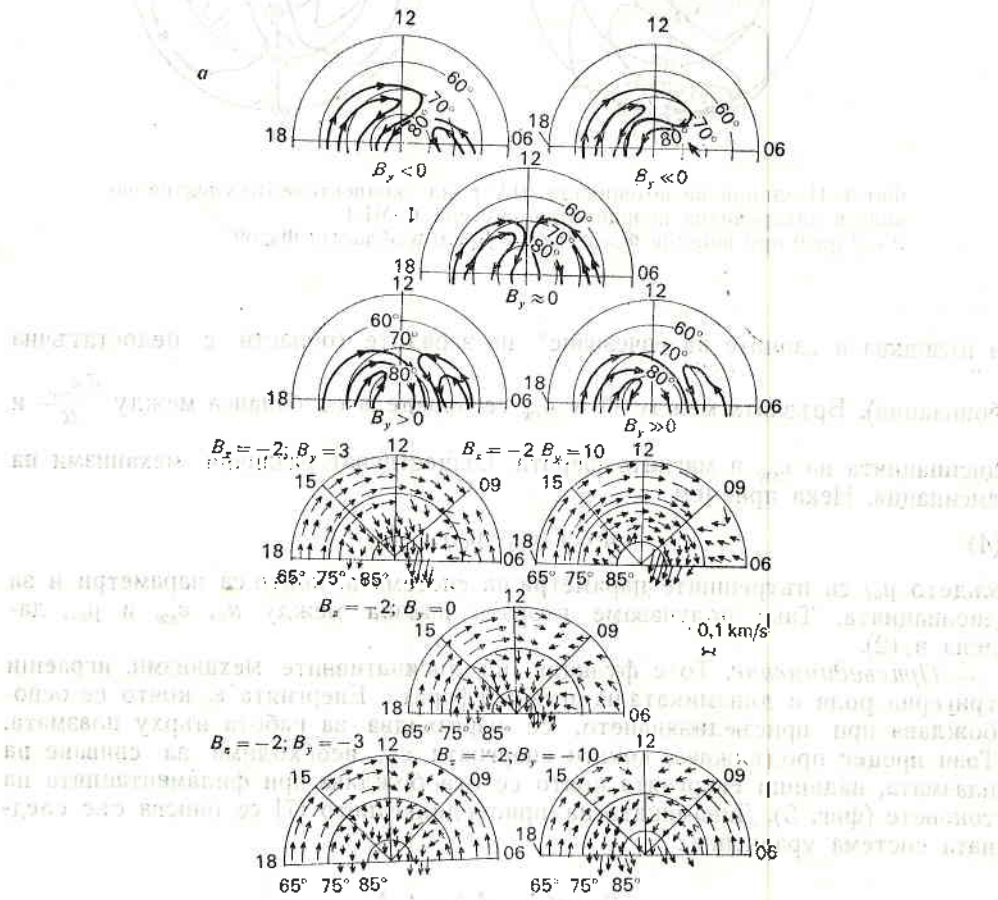
Сега ще представим по-подробно няколко процеса и примера, за които предполагаме, че споменатите идеи са валидни. Трябва да отбележим, че за връзката между тези процеси има формули, получени само чрез регресионен анализ на експериментални данни.

*Конвекция* (фиг. 3, 4). Тя е резултат от действието на индуцираното поле  $E = -V_{sw} \times B_0$ , което възниква при обтичане на магнитосферата от слънчевия вятър, т. е. конвекцията се явява при балансирането на потока енергия от слънчевия вятър и дисипацията ѝ за сметка на вътрешното триене и/или при процесите на присъединяване. Движението на плазмата в магнитосферата се описва с уравнение от вида:

$$(2) \quad m_\alpha \frac{du_\alpha}{dt} = e_\alpha (E + u_\alpha \times B_0) = f(\epsilon_{sw}, \mu_\alpha),$$

където  $\epsilon_{sw}$  е енергията на взаимодействие на слънчевия вятър с магнитно сферата. Индуцираното поле  $E$  може да се дефинира с въвеждане на потенциали  $\Phi$  и  $\psi$  по следния начин:

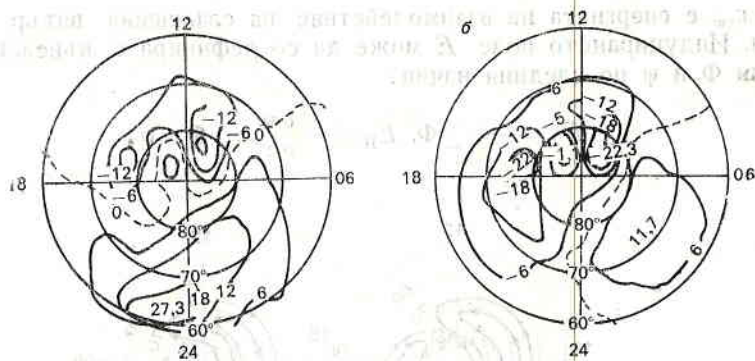
$$E_{\perp} = -\nabla_{\perp} \Phi, \quad E_{\parallel} = -\frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad \Phi \neq \psi,$$



Фиг.3. Модел на конвекцията във високоширинната дневна йоносфера в координатна система  $\Phi$ -MLT  
 а — в зависимост от  $B_y$  на ММП; б — в зависимост от  $B_y$  и  $B_x$  на ММП

където  $E_{\perp}$  и  $E_{\parallel}$  са компонентите му, съответно перпендикулярни и успоредни на магнитното поле на Земята  $B_0$ .  $E_{\perp}$  дава потенциалния пад през магнитосферата, който е от порядъка на 50—100 kV, а  $E_{\parallel}$  се явява функция на надлъжните токове  $J_{\parallel}$ , т. е.

$$(3) \quad -\frac{\partial \psi}{\partial z} = E_{\parallel} = f(J_{\parallel})$$



Фиг.4. Изолинии на потенциала (kV) на конвективното електрично поле в инвариантната координатна система  $\Phi$ -MLT  
 а —  $j_{\parallel} \neq 0$  при ширини  $\Phi > 58^\circ$ ; б —  $j_{\parallel} = 0$  в областта  $\Phi < 69^\circ$

и възниква в „зоните на изчезване“ на зарядите (области с недостатъчна йонизация). Връзката между  $\Phi$  и  $\epsilon_{sw}$  се определя от баланса между  $\frac{d\epsilon_{sw}}{dt}$  и дисипацията на  $\epsilon_{sw}$  в магнитосферата. Съществуват различни механизми на дисипация. Нека приемем

$$(4) \quad \Phi = f(\epsilon_{sw}, \mu_{ai}),$$

където  $\mu_{ai}$  са вътрешните параметри на системата, които са параметри и за дисипацията. Така получаваме втората връзка между  $\mu_{ai}$ ,  $\epsilon_{sw}$  и  $\mu_{ai}$ , дадена в (2).

*Присъединяване.* То е функция на дисипативните механизми, играещи тригерна роля в динамиката на магнитосферата. Енергията  $\epsilon$ , която се освобождава при присъединяването, се изразходва за работа върху плазмата. Този процес продължава, докато енергията  $\epsilon_m$ , необходима за свиване на плазмата, надвиши енергията, която се освобождава при филаментацията на токовете (Фиг. 5). Динамиката на присъединяването [7] се описва със следната система уравнения:

$$(5) \quad \begin{aligned} 0 &= g(j_{\perp}, A_y) - \Delta A_y, \\ \frac{dj_{\perp}}{dt} &= f(j_{\perp}, \nabla, A_y), \end{aligned}$$

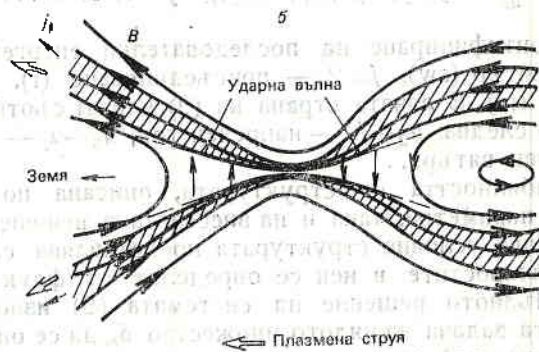
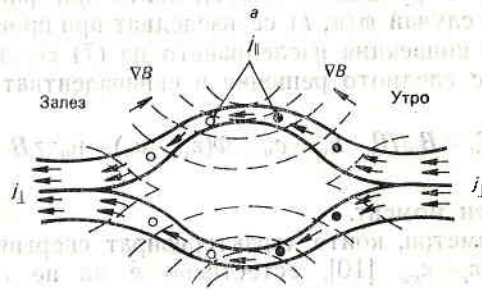
където  $A_y$  е векторният потенциал на магнитното поле,  $j_{\perp}$  — токът, течащ през неутралния слой. Връзката между  $\epsilon$  и  $A_y$  се намира след интегриране на първото уравнение (5). За по-нататъшния пренос на енергията  $\epsilon$ , е важна връзката

$$(6) \quad j_{\parallel} = g(j_{\perp}, A_y) - \Delta A_y.$$

Този ток определя дисипацията на енергията на смущението (неустойчивостта вътре в магнитосферата).



**Енергетични нива.** Уравненията (5) са частен случай на система, описваща динамиката в реактивно-дифузионни структури и съответства на разпространението на импулси по нервните [8]. Във фазовото пространство на системата затворена траектория, която минава през особена точка тип седло



Фиг.5. Физическа картина на присъединяването в областта на неутралната линия в опашката на магнитосферата  
*a* — сечение на неутралната линия, показваща бифуркацията на напречния ток и генерацията на надлъжните токове:  $\circ$  — изтичащ ток,  $\bullet$  — втичащ ток; *b* — меридионално сечение на неутралната линия, показващо връзката между магнитните линии, надлъжните токове, плазмените структури и фронтовете на съпътстващата присъединяването ударна вълна

(съответстваща на периодично решение), отговаря на този импулс. Тези автовъзли са обект на анализ в други работи [9]. За нас е важен фактът, че на фона на този процес се включва механизъм, който превръща част от тази енергия в енергия на движението на магнитосферната плазма. Естествено това движение може да се моделира, като се използва уравнение (2), записано в по-обща форма

$$(7) \quad \frac{du}{dt} = Lu + B(u, u)$$

или  $M \frac{du}{dt} = Lu + B(u, u)$ ,  
 където  $L, M$  са линейни оператори;  $B$  е нелинейна функция.

Решения на (7) са функциите  $\varphi(u, t)$ , които при фиксирано  $u$  се наричат движения. В общия случай  $\varphi(u, t)$  се изследват при произволни  $u$ . В случая на магнитосферната конвекция изследването на (7) се свежда до решаване на системата (2) със следното решение в еквивалентната равнина:

$$(8) \quad \frac{dx_a}{dt} = \frac{1}{e_a} F_a \times B_0 / B_0^2, \quad F_a = e_a \nabla \Phi(\varepsilon_{sw}, \mu_a) - \mu_a \nabla B - m_a \frac{du_{0a}}{dt},$$

където  $\mu_a$  е магнитен момент.

Тук влизат параметри, които характеризират енергията на кръговия ток  $\varepsilon_{rc}$ . Тъй като  $\varepsilon_{rc} \ll \varepsilon_r \ll \varepsilon_{sw}$  [10], естествено е да не се отчита обратното влияние, т. е. в посока към по-високи енергетични нива. Следователно може да се напише следната синергетична система от уравнения:

$$(9) \quad \frac{du_{j+1}}{dt} = f(\varepsilon_j, u_j, \mu_{j+1}, u_{j+1}), \quad j=1, 2, 3, \dots,$$

$j$  е индекс за идентифициране на последователни енергетични структури;  $j=1$  — слънчев вятър (sw),  $j=2$  — присъединяване (r),  $j=3$  — магнитосферна конвекция (m). В лявата страна на (9) влизат съответните движения или токове, както следва:  $u_2 \rightarrow j_1$  — напречен ток,  $u_3 \rightarrow u_i$  — йонен дрейф, ...,  $u_k \rightarrow u_n$  — неутрален вятър...

Очевидно стабилността на структурата, описана по-горе, е функция както на нейните параметри, така и на внесената в нея енергия  $\delta_j \varepsilon_j$ , където  $\delta_j \ll 1$ . Само при това условие структурата представлява слабо неустойчива система и неустойчивостите в нея се определят от флукуациите на малките параметри. Пълното решение на системата (9) изисква да се реши първо спектралната задача за цялото множество  $\delta_j$ , да се определят неустойчивостите (бифуркациите) за всяка структура и да се определи динамичното ѝ поведение. Стохастичността на движенията във всяка структура се определя от свойствата на системата, но невинаги и в границите на съответното енергийно ниво [11]. Този извод позволява да съсредоточим вниманието си върху малките параметри  $\delta_j$ , чиито изменения се оказват съществени за определяне на фазовите траектории, описващи СЗВ. В така описаната схема съществуващият каскаден пренос на енергия от Слънцето към земната повърхност и влиянието му върху човека определя йерархичната подчиненост на компонентите на системата Слънце — Земя. Съзнателно изключваме влиянието с галактичен и извънгалактичен произход поради липсата на надежден експериментален материал и съществуването на и без това свръхусложнена картина на взаимодействията.

В посочената подредба интерес представлява редуването на: енергетичноактивни (1), енергетичнопасивни (2), енергетичноотворени (3) и енергетичнозатворени области (4). Това разделяне очевидно е условно. Въпреки привидната обусловеност на групиране на областите (1) — (3) и (2) — (4) в тези от последната група съществуват източници на енергия, чието влияние може да се управлява, макар и в тесен интервал. Пример: изхвърленият при катастрофално вулканично изригване прах променя албедото, следва изменение на общата атмосферна циркулация и крупномащабните океански течения, което може да промени наклона на оста на въртене на Земята с



последвала промяна в работата на земното динамо и тектониката на земните плочи [12]. Чрез магнитосферно-ионосферните взаимодействия с интензифицирането на надлъжните токове, от които се определя конвекцията на плазмата, се осъществява предаване на основната част от електромагнитната енергия (импулс от магнитосферното поле, Ионосферата и атмосферата). Надлъжните токове се появяват (интензифицират), когато се наруши условието за идеална (безкрайна) проводимост по силовите линии на геомагнитното поле. Това условие по всяка вероятност се нарушава поради недостатъчност на носителите на заряди в Ионосферата, явяващи се управляващ параметър. При случай на вариация в концентрацията се изменя Ионосферната проводимост, която не може да компенсира натрупвания в магнитосферата заряд. Възниква потенциален пад (енергията на взаимодействието), в който се ускоряват йони и електрони, като йоните се изтеглят от Ионосферата. В резултат Ионосферата като енергетичнопасивна (и енергетичнозатворена) област изхвърля енергия (маса) в магнитосферата, макар че последната представлява енергетичноактивна област [6]. Тези примери дават представа за ролята и значението на собствените за всяка област енергетични източници в промяната на посоката на взаимодействието между подсистемите в на пръв поглед стационарната феноменологична картина на СЗВ.

## Л и т е р а т у р а

1. Чижевский, А. Земное эхо солнечных бурь. М., Наука, 1972.
2. Вернадский, В. И. Биосфера. М., Мысль, 1967.
3. Кей, М. Т., Д. Д. Марпл. Спектральный анализ. — ТИИЭР, 69, 1981, № 11.
4. Хакен, Г. Синергетика. М., Мир, 1985.
5. Сергеев, В. А., Н. А. Цыганенко. Магнитосфера Земли. М., Наука, 1980.
6. Липеровский, В. А., М. И. Пудовский. Аномальное сопротивление и двойные слои в магнитосферной плазме. М., Наука, 1983.
7. Галеев, А. А. Основы физики плазмы. Т. 2. М., Энергоатомиздат, 1984, с. 331.
8. Скотт, Э. Волны в активных и нелинейных средах в приложениях к электронике. М., Советское радио, 1977.
9. Васильев, В. А., Ю. М. Рогановский, В. Г. Яхно. Автоволновые процессы. М., Наука, 1987.
10. Солнечный ветер и околоземные процессы (ред. Фелдштейн Я. И.). М., Наука, 1986.
11. Лихтенберг, А., М. А. Либерман. Регулярная и стохастическая динамика. М., Мир, 1984.
12. Физические аспекты природных катастроф (ред. Штрихмайер, В. М.). М., Наука, 1983.

# Synergetic analysis of the solar-terrestrial relations

D. G. Gochev, P. I. Nenovski

(Summary)

A new method is proposed for the analysis of the solar-terrestrial relations (STR). In an examination of the key processes of the magnetospheric physics — reconnection and convection, the fundamental principles of synergetics are applied. The equations for the description of the reconnection are transformed into the form of a reactive-diffusive type equations system. The equations describing the interaction between the various STR structures are proposed to be interconnected through the governing parameters.