

## ПРЕДСКАЗАТЕЛНИ ВЪЗМОЖНОСТИ НА МОДЕЛИТЕ ЗА МОДУЛИРАНЕ НА СПЕКТЪРА НА ГАЛАКТИЧНИТЕ КОСМИЧНИ ЛЪЧИ ПРЕЗ СЛЪНЧЕВИЯ ЦИКЪЛ

**Маруся Бъчварова, Димитър Драганов**

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: marusjab@space.bas.bg*

**Ключови думи:** Моделиране, галактични космични лъчи, слънчев цикъл

**Резюме:** В тази работа са представени най-често използваните модели за модулиране на спектъра на галактичните космични лъчи през слънчевия цикъл и са дискутирани техните предсказателни възможности. Представен е и модел, чиито параметри са свързани с подходящо избрани слънчево-хелиосферни и геомагнитни индекси. Понеже потокът на галактичните космични лъчи за определена енергия показва известно закъснение спрямо стойностите на тези индекси, ние можем да използваме това, за да предскажем интензитета на космическото лъчение през слънчевия цикъл.

## PREDICTIVE ABILITIES OF GALACTIC COSMIC RAY MODELS

**Marusya Buchvarova, Dimitar Draganov**

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: marusjab@space.bas.bg*

**Keywords:** Modeling, galactic cosmic rays, solar cycle

**Abstract:** In this work, we present and discuss predictive abilities of galactic cosmic ray models. A model, whose parameters can be presented as a function of the solar-heliospheric and geomagnetic parameters, are given. Because the flux of GCR has a delay relatively to the values of determined parameters, we can use them to predict the intensity of the galactic cosmic rays.

### **Въведение**

Съществуването на Земята е немислимо без енергията, която получава от Слънцето. Освен електромагнитната радиация от Слънцето, нашата планета е изложена на непрекъснатото влияние на поток от високоенергетични частици, които са в състояние да влияят както върху здравето на живите организми и живота на планетата, така и върху атмосферната химия.

Магнитното поле на Земята и дебелината на нейната атмосфера пазят живота от убийствената космическа радиация и затова, тук на Земята, нейното влияние в ежедневието не е толкова осезаемо. Космическата ера, обаче, доведе със себе си пускането на много спътници и апарати за различни цели извън пределите на земната атмосфера, както и необходимостта от изпращането на хора в открития космос, там, където влиянието на потоците корпускулярна радиация върху техниката и здравето на човека придобива огромно жизненоважно значение.

В зависимост от източниците си корпускулярната космическа радиация се дели на аномална, слънчева и галактична. От изброените три типа радиация галактическата е най-високоенергетична и поради това с най-високопроникваща способност в земната атмосфера, оказвайки влияние на най-ниските й слоеве.

Основните процеси, влияещи на транспорта на галактичните космични лъчи (ГКЛ) в хелиосферата, са добре разбрани. Те са обобщени в транспортно уравнение, развито от Паркер през 1965. Обаче адекватното описание между модулационните процеси в

хелиосферата и модулираните спектри на ГКЛ си остава все още трудна и нерешена задача, понеже теоретичните модели съдържат много параметри, чиито стойности са неизвестни в хелиосферата. Това налага развиването на теоретични приближения и емпирични модели за описване на галактическия спектър през слънчевия цикъл [1].

### Емпирични и полу-емпирични модели за описване на интензитета на галактичните космични лъчи [1].

Поради трудностите, свързани с подробното описание на влиянието на хелиосферата и слънчевата активност върху модулацията на интензитета на космичните лъчи, наличието на различни емпирични и полу-емпирични модели е от фундаментално значение при моделиране на разнообразието от химични и физични процеси в атмосферата и междупланетната среда [2, 3]. В тази глава ние дискутираме най-често използваните модели, които дават възможност да бъде предсказан интензитета на галактичните космични лъчи, съчетавайки теорията със закономерности и зависимости, получени от наблюденията.

#### Модел на Nagashima and Morishita

Nagashima and Morishita в [4, 5] извеждат уравнение, което представлява една функционална зависимост между интензитета на космическото лъчение  $I(t)$  и подходящо избран индекс на слънчевата активност, зададен с  $S(t)$ :

$$(1) \quad I(t) = I_{\infty} - \int_{\tau=0}^{\infty} f(\tau)S(t-\tau)d\tau,$$

където  $I(t)$  and  $I_{\infty}$  са съответно модулирания и немодулирания интензитет на космическото лъчение. Тук единиците за интензитет са в броячни единици.  $S(t-\tau)$  е функция, представляваща подходящо избрани индекси на слънчевата активност за време  $(t-\tau)$  ( $\tau \geq 0$ ), а  $f(\tau)$  е характеристична функция [4, 5, 6]. Използвайки уравнение (1) и различни индекси (един или комбинация от няколко), като брой слънчеви петна [5], слънчеви потоци [7], геомагнитни индекси [6] и др., изследователите получават много добро съответствие между предсказаните и измерени по-късно интензитети на галактичните спектри. Mavromichalaki et al. [8, 9] има огромен принос, свързан с приложението на моделното уравнение (1). Той разглежда различни слънчево-хелиосферни параметри и изучава тяхната връзка с хелиосферната модулация на галактичните спектри през три различни фази на слънчевия цикъл и за различни полярности на хелиосферното магнитно поле.

Уравнение (1) се извежда на базата на теорията за конвекция-дифузия [10, 11, 12, 13], отчитайки Compton–Getting factor  $C$  и приемайки известни предположения. Според тази теория плътността на галактичните космични лъчи  $U(r, P)$  за сферично-симетрична модулационна област при квазистационарни условия за енергии над няколкостотин MeV/nuc1 се дава чрез израза:

$$(2) \quad U(r, P) = U_{LIS}(R, P_R) \exp\left[-\int_r^R \frac{CV}{k(r', P)} dr'\right]$$

Тук  $U_{LIS}$  е диференциалната плътност на границата на хелиосферата за разстояние  $R$ ,  $V$  е скоростта на слънчевия вятър,  $k$  е радиален дифузен коефициент, а  $P$  е твърдостта на частиците. На базата на уравнение (2), след известни съображения и трансформации Nagashima and Morishita [4, 5] дават формула (1).

#### Модел на ГКЛ, изведен от Nyttmik и съавтори

Моделът на ГКЛ, изведен от Nyttmik и съавтори в тази работа ще бъде наречен MSU (*Moscow State University*) модел [14–16]. Той отчита модулационните ефекти на магнитното поле на Слънцето през 22-годишния слънчев цикъл. MSU дава диференциалните интензитети на галактичните ядра (електрони и йони на елементите от водород до уран) като функция на твърдостта  $P$  в определен момент  $t$ ,  $D_i$  in  $s^{-1} m^{-2} sr^{-1} GV^{-1}$ , посредством зависимостта:

$$(3) \quad D_i(P, t) = D_{i0}(P) \left( \frac{P + P_0(t)}{P} \right)^{-\Delta_i(P, \text{sgn } z, P_0, t)}.$$

Тук  $D_{i0}(P) = D_{(i)LIS}(P)$  е немодулирания диференциален спектър на ГКЛ за  $i$  – тата частица;  $P_0(t) = P_0(W(\nabla T(n, P, t)))$  е ефективен модуляционен потенциал, изразен като функция на слънчевата активност посредством средномесечната стойност на числото на Волф  $W$ .  $W(\nabla T)$  е средномесечната стойност на числото на Волф за време  $t - \nabla T$  [15]; с  $n$  е означен номерът на слънчевия цикъл. Функцията  $\Delta_i = \Delta_i(P, \text{sgn } z, P_0, t)$  отчита влиянието на модуляцията в зависимост от заряда  $z$  на частицата.

В модела MSU [16] ефективният модуляционен потенциал е свързан със слънчевата активност. Тъй като измененията в спектъра на ГКЛ следват измененията в активността на Слънцето с определено закъснение (time lag  $(\nabla T)$ ), знаейки  $W$  (мярка за нивото на слънчевата активност в модела), законите по които вариациите в потока частици закъсняват спрямо вариациите в слънчевата активност и основните трендове, свързани с промените на хелиосферното магнитно поле, MSU модел е способен да предскаже потокът на галактичните космични лъчи през 22-годишен слънчев цикъл [16]. Когато ефектите от времезакъснението (time lag)  $\nabla T$  са осреднени през слънчевия цикъл,  $\nabla T$  се представя в най-общ вид като функция, която зависи от твърдостта  $P$  на частиците и от това какъв е слънчевия цикъл: четен или нечетен. В детайли обаче, времезакъснението има своите особености, които са общи само за четен и особености общи само за нечетен цикъл [16, 17].

Кратковременните прогнози от модела се правят на базата на измерения вече брой слънчеви петна, средносрочните прогнози са на основата на предсказания брой слънчеви петна и покриват 3 до 4-годишни периоди напред [16]. Дългосрочните прогнози зависят от точността, с която се предсказват числата на Волф  $W$  за настоящия и следващите слънчеви цикли и се подпомагат от модели, даващи изменението с времето и бъдещото поведение на магнитното поле на Слънцето [16].

### Модел Badhwar–O’Neill

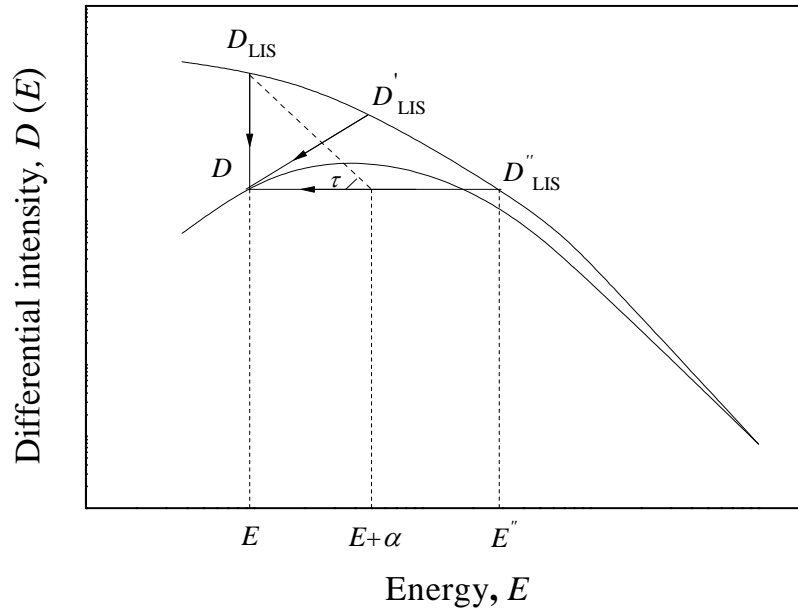
Моделът *Badhwar–O’Neill* (BO) дава възможност да се определят спектрите на галактичните космични лъчи за всички йони от водород до никел през 22-годишния слънчев цикъл. Посредством решаването на радиалната част на сферично-симетричното Fokker–Planck уравнение, използвайки експериментални данни (приложен е методът на Fisk [18]), този модел оценява време-зависимата част,  $k(t)$ , на дифузния коефициент  $k(r, t) = k(t)k_0\beta_c Pk_1(r)$  [19]; ( $\beta_c = v/c = (\text{particle speed}/\text{speed of light})$ ). Влиянието на магнитното поле на Слънцето върху навлизащите в хелиосферата космически частици се дава със зависимостта:  $k(r, t)/V(r, t) = (k_0/V)\beta_c Pk_1(r)/\phi(t)$  [20], where  $V = 400 \text{ km s}^{-1}$  for all  $t$ . Стойността  $k(t)$  се променя монотонно със слънчевата активност [19] и е обратно пропорционална на т.нар. deceleration parameter,  $\phi(t)$  [19]. В моделът  $\phi(t)$ , в MV, е пряко свързан със слънчевата активност и неговата стойност определя нивото на слънчева модуляция. Този параметър е свързан с енергията и твърдостта, необходима на частиците, за да преминат през хелиосферата и достигнат 1 AU [20]. Оригиналният Badhwar–O’Neill модел [19, 21, 22] дава метод за предсказване на модуляцията, определяйки зависимостта на  $\phi(t)$  от измерванията на Climax неутронния монитор, както и от броя на слънчевите петна в по-ранно време; най-добрата корелация между  $\phi(t)$  и броячните отношения на неутронния монитор (Climax) е намерена за закъснение от ~ 3 месеца, а между  $\phi(t)$  и броя слънчеви петна – приблизително 9 месеца. Корелационните функции са различни за три различни конфигурации на междупланетното магнитно поле: положителна полярност (т.е северната полусфера на слънчевото магнитно поле е с положителна полярност), отрицателна и за време, през което магнитното поле променя своя знак [21]. BO моделът е основан на стандартната теория за конвекция-дифузия при моделиране на галактическите спектри и параметърът  $\phi$  не зависи от заряда на частиците [21]. Ако знаем  $\phi$  за даден елемент, LIS може да бъде определен за останалите елементи посредством фитването на измерените експериментални спектри към транспортното Fokker–Planck уравнение [23]. През 2004 моделът беше приложен към ACE (Advanced Composition Explorer) измерванията на галактичните космични лъчи, осигурявайки по-прецизни спектри на частиците [20]. В него елемента кислород е избран за дефинирането на  $\phi(t)$  при определена параметризация на LIS [23, 24]. След намирането на  $\phi(t)$  от ACE/CRIS спектри на кислорода, моделът пресмята LIS за всички останали елементи [23, 24]. В новата, ревизирана версия на модела е определен и  $\phi_{CLI}(t)$ , използвайки данните от неутронния монитор Climax и са получени галактичните спектри след 1973 [23, 24]. Последната версия BO’10 включва по-новите 1997–2010 ACE данни и покрива шест слънчеви цикъла [23]. При определянето на  $\phi(t)$  BO’10 борави с брой слънчеви петна (the International Sunspot Number) [25].

### Модел на Vuchvarova и съавтори [1, 3]

Модела на Vuchvarova и съавтори за краткост тук ще бъде наречен CRSA (*cosmic-ray-spectrum approximation*) модел [2, 3]. Този модел представя тригонометрична зависимост, използвайки логаритмична скала (виж фиг.1)

$$(4) \quad \beta = \frac{\ln(D_{\text{LIS}}(E + E_0)) - \ln(D(E))}{\ln(E + \alpha) - \ln(E)},$$

където  $\alpha$  и  $\beta$  са параметри, като  $\beta = \tan \tau$ ,  $\tau$  - ъгъл в точка, съответстваща на енергия  $E + \alpha$ ;  $D_{\text{LIS}}(E + E_0)$  е локалният междузвезден спектър.



Фиг. 1. Локален междузвезден спектър,  $D_{\text{LIS}}(E + E_0)$ , и модулиран диференциален спектър на ГКЛ,  $D(E)$ , като функция на кинетичната енергия  $E$ ;  $\tau$  - ъгъл в точка, съответстваща на енергия  $E + \alpha$  [2, 3]

След известни трансформации уравнение (4) приема вида:

$$(5) \quad D(E) = D_{\text{LIS}}(E) \left(1 + \frac{\alpha}{E}\right)^{-\beta}.$$

На фиг. 2 е показана интерпретацията на модела CRSA [3] посредством функцията  $f(P)$  (omnidirectional distribution function). Тази фигура показва, че:

$$(6) \quad \beta_P = \frac{\ln(f_{\text{LIS}}(P)) - \ln(f(P))}{\ln(P + \alpha_P) - \ln(P)},$$

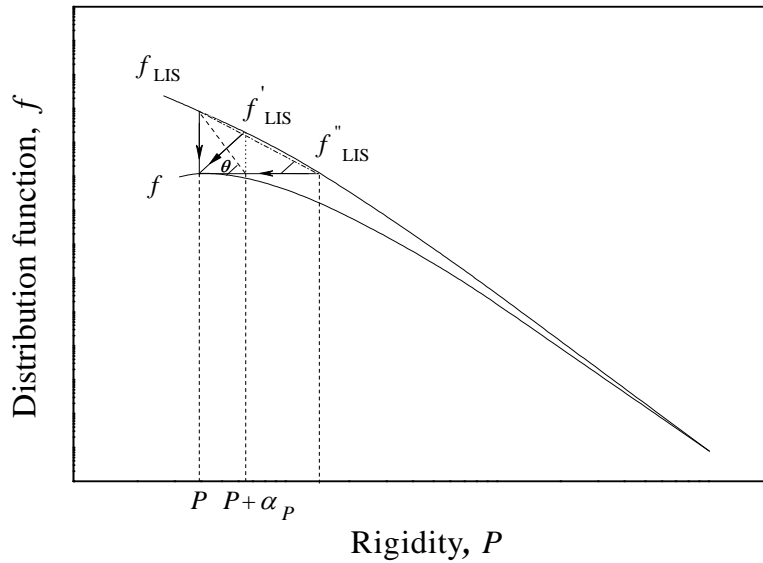
$\beta_P = \tan \theta$ . След известни трансформации уравнение (6) се презаписва във вида:

$$(7) \quad f(P) = f_{\text{LIS}}(P) \left(\frac{P + \alpha_P}{P}\right)^{-\beta_P}.$$

Диференциалният интензитет на космичните лъчи,  $D(E)$ , е свързан с диференциалната плътност,  $U(P)$ , чрез зависимостта [26]:

$$(8) \quad D(E) = c(A/Z)U(P)/4\pi.$$

Тук  $c$  е скоростта на светлината,  $A$  е масовия номер, а  $Z$  е заряда на частицата. Логаритмувайки двете страни на уравнения (2) и (5), получаваме:



Фиг. 2. Локален междузвезден спектър,  $f_{\text{LIS}}(P)$ , и модулиран спектър на ГКЛ,  $f(P)$ , описани чрез функция на разпределение  $f(P)$ ;  $\theta$  - ъгъл в точка, съответстваща на твърдост  $P + \alpha_P$  [3]

$$(9) \quad \ln \left[ \frac{U(r, P)}{U_{\text{LIS}}(R, P_R)} \right] = - \int_r^R \frac{CV}{k(r', P)} dr'$$

$$(10) \quad \ln \left[ \frac{D(E)}{D_{\text{LIS}}(E)} \right] = -\beta \ln \left( 1 + \frac{\alpha}{E} \right).$$

Полагайки изразът  $\ln(D(E)/D_{\text{LIS}}(E))$  от уравнение (10) в уравнение (9), отчитайки (8), се извежда една зависимост, която свързва параметрите на CRSA модела с основни физически параметри, определящи модуляцията на космическото лъчение през слънчевия цикъл:

$$(11) \quad \int_r^R \frac{CV}{k(r', P)} dr' = \beta \ln \left( 1 + \frac{\alpha}{E} \right).$$

Основен недостатък на оригиналния CRSA модел е, че параметрите  $\alpha$  и  $\beta$  не зависят от времето  $t$  и твърдостта на частиците  $P$ , а също и това, че моделът не отчита основни трендове във вариациите на хелиосферното магнитно поле, т.е. влиянието на различните конфигурации на магнитно поле през 22-годишния слънчев цикъл се игнорира [3]. Нашата цел е за в бъдеще да развием оригиналния CRSA модел, свързвайки стойностите на неговите параметри  $\alpha$  и  $\beta$  с подходящо избрани слънчево-хелиосферни индекси [3]. По този начин нашият модел би имал практическо приложение чрез предсказателните си възможности. За тази цел Buchvarova and Draganov [1] извеждат формула, която дава връзката между параметрите  $\alpha_P$  и  $\beta_P$  на моделното уравнение (7) и подходящо избрани слънчево-хелиосферни и геомагнитни индекси за определена твърдост  $P_\xi$ :

$$(12) \quad \beta_P \ln \left( 1 + \frac{\alpha_P}{P_\xi} \right) = G \left( \sum_i a_i X_i \right)$$

$G = G \left( \sum_i a_i X_i \right)$  е функция на определена линейна комбинация от селектирани индекси  $X_i$ ;  $a_i$  са коефициенти [9].

Развитието на уравнение (12) в бъдеще е свързано с намирането на най-добри корелации между вариациите в интензитетата на ГКЛ и вариациите на подходящо избрани

слънчево-хелиосферни параметри (число на Волф, слънчев поток, междупланетно магнитно поле и т.н.) през 22 –годишния слънчев цикъл [3].

### Заклучение

В тази работа е направен преглед на най-често използваните модели на ГКЛ, като са дискутирани техните възможности за предсказване на интензитета на космическото лъчение. В статията е представен и модел, който параметризира спектъра с две величини  $\alpha$  и  $\beta$ , които се менят в зависимост от нивото на слънчевата активност. Разгледана е и възможността за в бъдеще тези параметри да бъдат зададени като функция на времето и твърдостта на частиците. За тази цел е изведена зависимост, която дава връзката между параметрите  $\alpha_P$  и  $\beta_P$  и линейна комбинация от подходящо избрани слънчево-хелиосферни и геомагнитни индекси за определена твърдост  $P_\xi$ .

### Литература:

1. Buchvarova, M., D. Draganov. Proceedings of the 4th School and Workshop on Space Plasma Physics. *AIP Conference Proceedings*, 1551, pp. 170-178, 2013.
2. Buchvarova, M., I. Buchvarov and P. Velinov. *Planet. Space Sci.* 59, 2011.
3. Buchvarova, M., D. Draganov. *Solar Phys.* 284, 2013.
4. Nagashima, K., I. Morishita. "Long Term Modulation of Cosmic Rays Part I – Basic Equation as a Function of Solar Activity, Derived from Coasting Solar Wind Model" in *Proceedings of 16 ICRC 3*, edited by S. Miyake, Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Chiba 277-8582, pp. 313–318, 1979.
5. Nagashima, K., I. Morishita. *Planet. Space Sci.* 28, 1980.
6. Xanthakis, J., H. Mavromichalaki and B. Petropoulos. *Astrophys. Space Sci.* 74, 1981.
7. Hatton, G. J. *Solar Phys.* 66, 1980.
8. Mavromichalaki, H., A. Belehaki and X. Rafios. *Astron. Astrophys.* 330, 1998.
9. Mavromichalaki, H., E. Paouris and T. Karalidi. *Solar Phys.* 245, 2007.
10. Gleeson, L. J., W. I. Axford. *Astrophys J.* 149, 1967.
11. Fisk, L. A., W. I. Axford. *J. Geophys. Res.* 74, 1969.
12. Parker, E. N. *Phys. Rev.* 110, 1958.
13. Parker, E. N. *Planet. Space Sci.* 13, 1965.
14. Suslov, A. A., R. A. Nymnik. "A semi-empirical model for large scale modulation of galactic cosmic ray energy spectra" in *Proceedings of 21 ICRC 6*, edited by R. J. Protheroe, University of Adelaide, Adelaide SA 5005, pp. 33–37, 1990.
15. Nymnik, R. A., M. I. Panasyuk, T. I. Pervaja and A. A. Suslov. *Nucl. Tracks Radiat. Meas.* 20, 1992.
16. Nymnik, R. A., M. I. Panasyuk and A. A. Suslov. *Adv. Space Res.* 17, 1996.
17. Nymnik, R. A. *Adv. Space Res.* 26, 2000.
18. Fisk, L. A. *J. Geophys. Res.* 76, 1971.
19. Badhwar, G. D., P. M. O'Neill. *Adv. Space Res.* 14, 1994.
20. O'Neill, P. M. *Adv. Space Res.* 37, 2006.
21. Badhwar, G. D., P. M. O'Neill. *Adv. Space Res.* 17, 1996.
22. Badhwar, G. D., P. M. O'Neill. "Time lag of twenty-two year solar modulation" in *Proceedings of 23 ICRC 3*, edited by R. B. Hicks, D. A. Leahy and D. Venkatesan, Department of Physics and Astronomy, The University of Calgary, Calgary T2N 1N4, pp. 535–538, 1993.
23. Mertens, C. J. et al. "Atmospheric Ionizing Radiation from Galactic and Solar Cosmic Rays", in *Current Topics in Ionizing Radiation Research*, edited by M. Nenoj, InTech, HR-51000 Rijeka, pp. 683–738, 2012.
24. O'Neill, P. M. *Advances in Space Research* 37, 2006.
25. O'Neill, P. M. *IEEE Transactions in Nuclear Science* 57, 2010.
26. Morai, H. *Space Sci. Rev.* 19, 1976.