

ХЕЛИОСФЕРНА МОДУЛАЦИЯ НА ПЪРВИЧНОТО КОСМИЧЕСКО ЛЪЧЕНИЕ. ЕМПИРИЧНО МОДЕЛИРАНЕ

Маруся Бъчварова¹, Петър Велинов²

¹*Институт за космически изследвания - Българска академия на науките*
²*Институт за слънчево-земни въздействия - Българска академия на науките*
e-mail: marusjab@space.bas.bg

Ключови думи: космическа радиация, 11 – годишен слънчев цикъл, галактични космически лъчи, моделиране, Force - field (ФФ) приближение.

Резюме: Галактичните космически лъчи (ГКЛ) са основния йонизационен източник на височина между 3 и 35 km в земната атмосфера. Ролята на аномалната компонента на космическите лъчи е съществена за атмосферната йонизация при високи ширини. В тази работа е разгледан емпиричен модел на диференциалните спектри на галактичните и аномални космически лъчи в енергетичен интервал от 1 MeV до 100 GeV през даден слънчев цикъл. Моделираните данни от експериментите: LEAP87, IMAX92, CAPRICE94, AMS98 and BESS покриват три слънчеви цикъла - 20, 22 и 23. Анализирани са ролята на апроксимираните параметри с изменение на слънчевата активност. Емпиричният модел е сравнен с Force - field (ФФ) решение на едномерното транспортно уравнение. Намерена е математическа връзка между модулационния параметър Φ и стойностите на параметрите за галактичната част на спектъра. Пресмятанията са извършени с алгоритъм на Левенберг-Марквард.

HELIOSPHERIC MODULATION OF PRIMARY COSMIC RAY SPECTRA. EMPIRICAL MODELLING

Marusja Buchvarova¹, Peter Velinov²

¹*Space Research Institute – Bulgarian Academy of Sciences*
²*Institute for Solar-Terrestrial Influences – Bulgarian Academy of Sciences*
e-mail: marusjab@space.bas.bg,

Keywords: cosmic radiation, 11 – year solar cycle, galactic cosmic rays, modeling, Force - field approximation.

Abstract: The galactic cosmic rays (GCR) are the main ionization source at altitude of ~ 3 to 35 km in the atmosphere. For high latitude anomalous cosmic ray (ACR) component has also a significant influence on the atmospheric ionization. We discuss an empirical model that describes differential spectra $D(E)$ of galactic and anomalous cosmic rays in energy interval 1 MeV – 100 GeV during solar cycle. The LEAP87, IMAX92, CAPRICE94, AMS98 and BESS experimental spectra for protons (covering three solar cycles: 20, 22 and 23) are fitted to the empirical model. The role of the fitted parameters is analyzed. Model approximations to Force Field solutions to the one-dimensional transport equation are compared with the proposed model. A mathematical relation between parameters in the developed model for GCR and the modulation parameter Φ is found. The calculation of the model parameters is performed by Levenberg-Marquardt algorithm, applied to the special case of a least squares.

Въведение

В най-общ смисъл космическите лъчи (КЛ) са поток от протони, ядра, електрони и античастици, т.е. стабилни първични частици. Почти 90% от КЛ, които достигат до земната атмосфера са протони и около 9% са алфа частици. Това разпределение на космическите лъчи е приблизително независимо от енергията за енергетична област от около 10 MeV/nuc до няколко GeV/nuc. Към КЛ се отнасят също и частиците, породени в атмосферата на Земята в резултат на взаимодействието на първичните космически лъчи с атомните ядра на въздуха.

Основна част от падащите на границата на атмосферата CR имат галактичен произход - галактични космически лъчи (ГКЛ). При енергии $10^6 \div 10^8$ eV се наблюдава така наречената аномална компонента на КЛ. Аномалните космически лъчи (АКЛ) се ускорени на границата на хелиосферата.

Интензитетът на космическата радиация с енергия по-малка от 15 - 20 GeV варира през 11- годишния слънчев цикъл и модулацията и се изучава с различни приближения на транспортното уравнение на космическите лъчи, изведено за пръв път от Паркер през 1965г [1]. Пълното решение на тримерното уравнение за разпространението на космическите лъчи в хелиосферата във времето [2] е рядко използвано поради неговата сложност. По - сложните (двумерни или тримерни модели) не могат да бъдат използвани при дълго-периодичните вариации на космическите лъчи, тъй като техните многобройни параметри не се апроксимират с прости времеви серии на магнитното поле, както и поради наличието на много неизвестни параметри или допускания в тримерните модели. Най-често диференциалният спектър на галактичните космически лъчи през 11-годишния слънчев цикъл се описва с т.н. Force - field (ФФ) приближение [3, 4, 5]. ФФ апроксимацията е най-използваното приближение за параметризация на галактичния спектър при пресмятането на индуцираната йонизация и продукцията от космогенни изотопи в атмосферата [6, 7]. Параметризираният диференциален спектър се използва също при пресмятанята на атмосферните каскади в течение на слънчевия цикъл.

ФФ решението на транспортното уравнение е подходяща апроксимация на галактичните космически лъчи във вътрешните области на хелиосфера, където енергетичните загуби са съществени (това приближение заменя адиабатните енергетични загуби със симулирани енергетични загуби) [4]. Обаче, при някои измервания експерименталните спектри за Земята не могат да бъдат апроксимирани с ФФ модел. Например, малки разлики се наблюдават между ФФ решенията и балонните измервания BESS2000, 2002 [8]. Разгледаният тук емпиричен модел дава добри резултати при апроксимиране на експерименталните данни както за BESS2000 и 2002 [8, 9], така и за експерименталните измервания на космическите протони: LEAP87 [10], IMAX92 [11], CAPRICE94 [12], AMS98 [13] и BESS 97, 98 и 99 [8, 9]. Основната функция на този емпиричен модел е използването му в атмосферни и хелиосферни пресмятания през слънчевия цикъл. Изразът за диференциалния спектър е даден в удобна за пресмятане форма.

Спектър на галактичните и аномални космически лъчи

Диференциалният спектър на протоните и други групи от космични ядра с отчитане на аномалната компонента на космическата радиация се дава с израза [14]:

$$(1) \quad D(E) = D_{LIS}(E) \left(1 + \frac{\alpha}{E}\right)^{-\beta} \left\{ \frac{1}{2} [1 + \tanh(\lambda(E_c - \mu))] \right\} + \left(\frac{x}{E^y}\right) \left\{ \frac{1}{2} [1 - \tanh(\lambda(E_c - \mu))] \right\}$$

Спектарът се измерва в единици: $\text{part}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{ster} \cdot \text{MeV}/\text{nucl})$. Първият член в уравнение (1):

$$(1a) \quad D_{GCR}(E) = D_{LIS}(E) \left(1 + \frac{\alpha}{E}\right)^{-\beta}$$

описва модулацията на галактичния спектър в областта от енергии: ~ 30 MeV to 100 GeV. Вторият член:

$$(1b) \quad D_{ACR}(E) = \left(\frac{x}{E^y}\right)$$

отчита аномалната компонента за енергии от 1 MeV до около 30 MeV. С E е означена кинетична енергия (в GeV), а $D_{LIS}(E)$ е локалния междузвезден спектър (ЛМС). Параметрите α и β задават модулацията в областта от енергии ~ 30 MeV до 20 GeV. Величината α има значение на енергия (в GeV), докато β е безразмерна. Параметрите x и y задават хелиосферната модулация на аномалната компонента за енергии от ~ 1 MeV до 30 MeV. Членовете с \tanh са изглаждащи функции между галактичния и аномалния спектър. Ролята на тези функции за изглаждането между двата спектъра е разгледа подобно в [14,15]. Физическото значение на μ [GeV] е енергията $E_{1/2}$ при която диференциалният спектър на ГКЛ и диференциалният спектър на АКЛ

участват с половината от своите стойности към сумарния спектър $D(E)$. С E_c означаваме енергията при която диференциалният спектър на ГЛЛ пресича диференциалния спектър на АКЛ. Приносът на галактичните и аномалните космически лъчи към спектъра за енергия E_c се определя от стойността на λ . В нашите пресмятания $\lambda = 100$ [15]. В този случай стойността на E_c е близка до стойността на $E_{1/2}$.

За енергии от 20 GeV до 100 GeV хелиосферната модулация е слаба и ЛМС се задава със степен спектър:

$$(2a) \quad D_{LIS} = K_0(E + E_0)^{-\gamma}$$

K_0 and γ формират спектъра на галактичните космически лъчи над 20 GeV, а $E_0 = 0.938$ GeV е енергията на покой на протона [16].

Поради хелиосферната модулация първичният спектър на космическите лъчи под няколко GeV е труден за определяне. Ето защо се допуска по-голяма свобода при неговото нормиране и моделиране под енергии от няколко десетки GeV. В (2a) се въвежда нормировъчна константа k , за да апроксимира данните под 10 GeV, където първичният спектър става по – равнинен:

$$(2b) \quad D_{LIS} = kK_0(E + E_0)^{-\gamma}$$

Когато във формула (1) за ЛМС използваме изразът (2b), параметрите α и β имат принос не само при моделирането на галактичния спектър под 10 GeV, но и при моделирането на локалния междузвезден спектър.

Тъй като немодулираният спектър не може да бъде измерен директно на Земята, в литературата могат да бъдат намерени различни теоретични и емпирични оценки на ЛМС за областта от енергии от 200 MeV до 100 GeV. Един от най-често използваните изрази за ЛМС е даден в [17]:

$$(2c) \quad D_{LIS}(E) = \frac{1.910^4 P(E)^{-2.78}}{1 + 0.4866P(E)^{-2.51}}$$

Спектърът (2c) лежи между емпирично изведените и теоретично пресметнати ЛМС в областта на енергии от 1 до 10 GeV [18]. Това обуславя неговото много често приложение при теоретичните апроксимации на транспортното уравнение за разпространението на първичните космически лъчи в хелиосферата.

В работата са използвани уравнения (2a) и (2b) за ЛМС, когато апроксимираме експерименталните данни към модела и изразът (2c) за ЛМС, когато сравняваме ФФ приближението с предложениния спектър.

Моделни апроксимации на експериментални данни

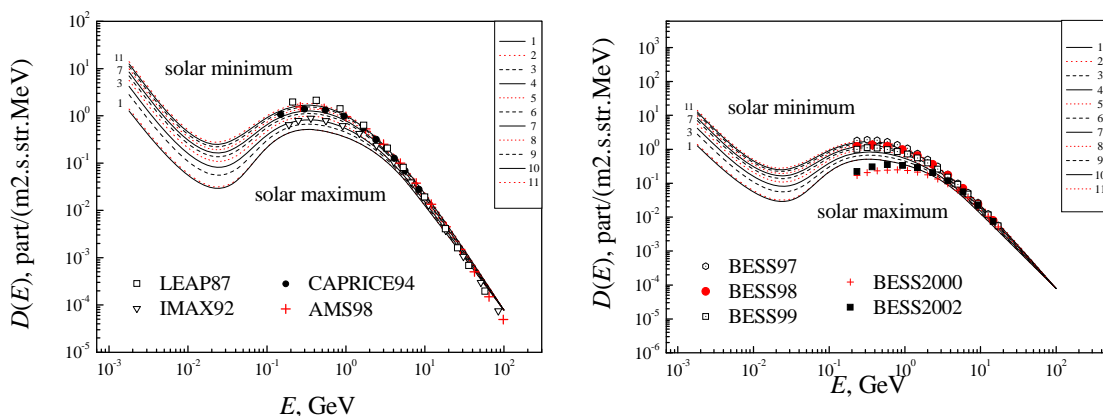
При апроксимиране на уравнение (1) към експерименталните данни са използвани данни от три слънчеви цикъла (20, 22 и 23). Измерванията на космическия спектър за енергии от 1 MeV до 100 GeV за 20^{ти} слънчев цикъл (1965-1969) са дадени от Hillas [19] и Simpson [20]. При моделирането на тези спектри за ЛМС се използва формула (2a). Нормировъчните константи за протоните са: $K_p=14.56$ [GeV^{2.63}/(s.m²ster.MeV)] и $\gamma_p=2.63$ [19]. Параметрите α , β , x , y and μ са пресметнати по алгоритъма на Левенберг-Марквард [21]. Този числен метод може да бъде разглеждан като комбинация от метода на най-бързото спускане и метода на Гаус – Нютон [21].

Фиг. 1 показва моделираните спектри $D(E)$ за космическите протони за 11 нива на слънчевата активност (криви от 1 до 11) за 20-ия слънчев цикъл. Таблица 1 дава моделните параметри от уравнение (1) за слънчев минимум (1965) и максимум (1969) за галактичните протони. Редуцираните стойности χ^2_n са по-малки от 1, което е индикатор за добра апроксимация на модела към експерименталните данни.

Стойността на параметъра α нараства от слънчев минимум към слънчев максимум, докато β остава почти константа ($\beta \approx 1$). За аномалните космически лъчи нормировъчната константа x има по-висока стойност при слънчев минимум, отколкото при слънчев максимум. Това е очаквано, тъй като интензитета на аномалната компонента нараства тогава, когато ефекта на слънчевата модулация намалява. Параметърът y се променя много бавно от слънчев минимум към максимум, а лекото нарастване на μ с нарастване на слънчевата активност е индикатор за слабото отместване на минимума на спектъра (1) към по-високи енергии при преход към максимална слънчева активност.

Експерименталните спектри на галактичните протони от измерванията: LEAP87 [10], IMAX92 [11], CAPRICE94 [12], AMS98 [13] и BESS [8,9] са апроксимирани с уравнение (1a),

описващо галактическата част на спектъра с D_{LIS} – формула (2b). Във формула (2b) полагаме $K = kK_0$. Таблицы 2 и 3 дават стойностите на спектралния индекс γ , пресметнатите параметри α и β и техните стандартни отклонения χ^2_n за измервателните данни. Стойностите χ^2_n показват добро съответствие на измерените експериментални спектри с предложения емпиричен модел.



Фиг. 1. Моделирани диференциални спектри $D(E)$ на галактични и аномални космически протони за единадесет нива на слънчевата активност през 20-тият слънчев цикъл в съответствие с експерименталните спектри дадени Hillas (1972) and Simpson (1992). 1a) Сравнение на моделираните спектри с измерванията на \square LEAP87 (Seo et al., 1991), ∇ IMAX92 (Menn et al., 2000), \bullet CAPRICE94 (Boezio et al., 1999) и $+$ AMS98. Експериментите LEAP87 (Seo et al., 1991), IMAX92 (Menn et al., 2000) и \bullet CAPRICE94 (Boezio et al., 1999) са проведени през 22 слънчев цикъл (1986-1996), докато спътниковите изследвания с $+$ AMS98 (Alcaraz et al., 2000) са близо до минимума на 23 слънчев цикъл (1996-2008); 1b) Сравнение на моделираните спектри с балонни данни от измерванията с BESS (Shikaze et al., 2007) през слънчевия цикъл 23.

Таблица 1. Пресметнатите параметрични стойности K , α , β , x , y , μ и χ^2_n от уравнение (1) за галактични и аномални протони при ниска и висока стойност на слънчевата активност за Земята, $\gamma = 2.63$

Моделни параметри	K	α	β	x	y	μ	χ^2_n
Слънчев максимум	$1.455761E+1$	$9.848129 \pm 7.36728E-1$	$8.81466E1 \pm 1.5875E-2$	$1.23191E-5 \pm 1E-6$	$1.825847 \pm 1.5341E-2$	$4.3094E-2 \pm 9.8E-4$	$5.81162E-1$
Слънчев минимум	$1.455761E+1$	$1.10811 \pm 8.5916E-2$	$1.029657 \pm 2.58480E-2$	$1.88999E-4 \pm 1.7E-5$	$1.79174E \pm 1.5845E-2$	$1.268E-2 \pm 2.027E-3$	$7.7175E-2$

Таблица 2

Изчислените моделни параметри K , α , β and χ^2_n за галактични протони за експериментите: LEAP87[10], IMAX 92[11], CAPRICE 94 [12] и AMS 98[13].

Експерименти	LEAP87	IMAX 92	CAPRICE94	AMS98
γ	2.63	2.61	2.73	2.76
K	$10.503 \pm 1.7E-2$	$9.327 \pm 0.1.28E-1$	$14.871 \pm 3.9E-2$	$17.410 \pm 3.07E-1$
α	$0.439 \pm 2E-3$	$1.183 \pm 5E-2$	$1.907 \pm 9E-3$	$2.2 \pm 9.6E-2$
β	$1.131 \pm 4E-3$	$1.022 \pm 1.8E-2$	$0.896 \pm 2E-3$	$0.874 \pm 2E-2$
χ^2_n	2.49	0.47	1.16	0.25

Таблица 3

Изчислените моделни параметри K , α , β and χ^2_n за галактични протони за експериментите: BESS97, BESS98, BESS99, BESS2000 и BESS2002 [8], $\gamma = 2.732$ [9].

Експерименти	BESS97	BESS98	BESS99	BESS2000	BESS2002
K	$18.046 \pm 1.85E-1$	$17.424 \pm 1.9E-1$	$17.929 \pm 1.96E-1$	$21.763 \pm 2.50E-1$	$19.91 \pm 1.2E-1$
α	$2.867 \pm 6.9E-2$	$2.337 \pm 4.8E-2$	$3.238 \pm 6.2E-2$	$5.369 \pm 6.5E-2$	$3.336 \pm 2.5E-2$
β	$0.706 \pm 8E-3$	$0.926 \pm 9.9E-3$	$0.914 \pm 8E-3$	$1.428 \pm 8E-3$	$1.522 \pm 6E-3$
χ^2_n	0.17	0.14	0.24	0.48	1.48

Моделиранияте 11 протонни спектри за периода 1965-1976 са сравнени с данни от експериментите: LEAP87 [10], IMAX92 [11], CAPRICE94 [12], AMS98 [13] на Фиг. 1а, а на Фиг. 1б с балонните измервания: BESS 1997, 1998, 1999, 2000 и 2002 [8,9].

Сравнение на емпиричния модел с ФФ приближение на транспортното уравнение

Модулацията на космическите лъчи в хелиосферата е описана напълно от уравнението на Parker [1]. Пълното решение на транспортното уравнение [2] е рядко използвано поради неговата сложност. Изразът за транспорта на космическите лъчи в околност на Земята може да бъде редуциран до т.н. ФФ приближение при следните допускания: 1) сферично – симетрична хелиосфера, 2) равновесен поток, 3) липса на източници на космически лъчи и 4) замяна на адиабатните енергетични загуби със симулирани такива [18]. Решението на това редуцирано уравнение е валидно за енергии над 200 MeV [4].

ФФ параметризацията на космическия спектър за 1 AU се дава с израза [3]:

$$(3) \quad D(E, \Phi) = D_{LIS}(E + \Phi) \frac{E(E + 2E_0)}{(E + \Phi)(E + \Phi + 2E_0)}$$

$D(E, \Phi)$ е интензитета на потока частици, а $D_{LIS}(E + \Phi)$ е локалният спектър на границата на хелиосферата, $E_0 = 0.938$ GeV е масата на покой на частицата. Параметърът $\Phi = (Ze/A)\varphi$, като φ е модулационен потенциал (в GV). Физическото значение на Φ са средни енергетични загуби на космическите частици в хелиосферата.

От уравнение (3) пресмятаме диференциалния спектър на протоните за определени стойности на модулационния параметър Φ . При пресмятанята за $D_{LIS}(E + \Phi)$ използваме формула (2c). Теоретично получените от формула (3) спектри за дадено Φ са апроксимирани от моделно уравнение (1a). Във формула (1a) за $D_{LIS}(E)$ е използвана също формулата на Burger et al. [17], т.е. уравнение (2c). Пресметнатите параметри α и β за различни Φ са дадени в Таблица 4. При апроксимиране на ФФ спектрите (3) от модела (1a) стандартните отклонения са $\sim (1-2)\%$ за ниски и средни нива на модулация ($\varphi < 0.8$ GV) и $\sim 3\%$ за високи стойности ($\varphi > 0.8$ GV).

Таблица 4. Изчислените моделни параметри за галактичните протони α и β за модулационни нива $\Phi = \varphi/2$: 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 and 0.8 GeV

Параметри	$\Phi = 0.3$	$\Phi = 0.4$	$\Phi = 0.5$	$\Phi = 0.6$	$\Phi = 0.7$	$\Phi = 0.8$
α	1.446600	1.766995	2.078808	2.372635	2.654086	2.924539
β	0.921775	1.049210	1.153789	1.244398	1.324410	1.396325

От Таблица 4 намираме следната зависимост между стойностите α и β и ФФ параметъра $\Phi = (eZ/A)\varphi$:

$$(4) \quad \Phi \approx \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\alpha\beta}{3} \right) \quad \text{или} \quad \beta \approx \Lambda \left(\frac{3\Phi}{\alpha} \right)$$

Коефициентът Λ е приблизително 1.618. Пресмятанята показват, че тази стойност не зависи от избора на D_{LIS} в уравнения (1a) и (3), или $\Lambda \approx 1.618$, когато апроксимираме с различни формули за D_{LIS} .

Трябва да бъде подчертано обаче, че уравнения (4) са валидни само ако формулата за D_{LIS} е една и съща в емпиричния модел (1a) и във ФФ решението на транспортното уравнение (3). Във всички останали случаи, когато в двете апроксимации на спектъра се използват различни формули за ЛМС, зависимостите дадени с (4) са невалидни.

Заклучение

Различните типове атмосферни модели дадени от Stozhkov [22], Clem et al. [23], Djemil et al. [24] и много други показват, че спектрите на космическите лъчи са от фундаментална важност при моделиране на разнообразието от физични и химични процеси в атмосферата и слънчево-земните връзки. Космическите лъчи са източници на атмосферни йони, които играят важна роля в процесите на: химични реакции с обмяна на заряд, образуването на водни пари и ледени кристали, формирането на гръмотевични (буреносни) облаци и всички останали видове облаци.

Галактичните и слънчевите космически лъчи са драйвери на слънчево-атмосферната динамика [25]. Поради тяхната модулация от слънчевия вятър, спектрите на тези частици са повлияни от изменението в активността на Слънцето в течение на слънчевия цикъл. Диференциалният спектър $D(E)$ на галактичните и аномални космически лъчи може да бъде

изполван при пресмятане на профилите на електронната продукция в атмосферата и йоносферата за ниски, средни и високи ширини през слънчевия цикъл. Това приложение на моделният спектър (1) е разгледано в работите на Velinov et al. [26], [27] и [28]. Изчислените профили на електронната продукция са необходими при определяне на електронната плътност и електричната проводимост на йоносферата в зависимост от слънчевата активност.

Литература:

1. Parker E.N. The passage of energetic particles through interplanetary space, *Planet. Space Sci.*, 13, 1965, pp.9-49.
2. Kota J., J.R Jokipii. The role of corotating interaction regions in cosmic-ray modulation, *Geophys. Res. Lett.*, 18 (10), 1991, pp. 1797- 1800,
3. Gleeson L.J., W.I Axford. Solar modulation of galactic cosmic ray. *Astrophys. J.*, 154, 1968, pp. 1011-1026
4. Gleeson L.J., I.A. Urch. *Astrophys. Space Sci.*, 25, 1973, pp. 387–404.
5. Caballero-Lopez R. A., H. Moraal. Limitations of the force field equation to describe cosmic ray modulation, *J. Geophys. Res.*, 109 (A1), 2004, pp. 1011-1017.
6. Usoskin I.G. et al. Ionization of the Earth's atmosphere by solar and galactic cosmic rays, *Acta Geophys.*, 57 (1), 2009, pp. 88-101.
7. Usoskin I.G., et al. Short-term production and synoptic influences on atmospheric ⁷Be concentrations, *J. Geophys. Res.*, 114 (D6), 2009, pp. 108 – 118.
8. Shikaze Y. et al. Measurements of 0.2 - 20 GeV/n cosmic-ray proton and helium spectra from 1997 through 2002 with the BESS spectrometer. *Astropart. Phys.*, 28 (1), 2007, pp. 154-167 .
9. Yamamoto A. Precise measurement of low energy (< TeV) cosmic-rays with BESS. International Workshop on Energy Budget in the High Energy Universe, ICRR, Univ. Tokyo, Feb. 22-24, 2000.
10. Seo E. S. et al. Measurement of cosmic-ray proton and helium spectra during the 1987 solar minimum, *Astrophys. J.*, 378 (2), 1991, pp. 763-772.
11. Menn W. et al. The absolute flux of protons and helium at the top of the atmosphere using IMAX, *Astrophys. J.*, 533(1), 2000, pp. 281 – 297.
12. Boezio M. et al. The cosmic ray proton and helium spectra between 0.4 and 200 GV, *Astrophys. J.*, 518(1), 1999, pp. 457-472.
13. Alcaraz J. et al. Cosmic protons. AMS collaboration, *Phys. Lett. B*, 490(1-2), 2000, pp. 27 - 35
14. Velinov P.I.Y. Expression for differential spectrum of primary cosmic rays with smoothing function tangens hyperbolicus, *C. r. Acad. bulg. Sci.*, 55(1), 2002, pp. 51-56.
15. Buchvarova M. PhD Thesis, Sofia, 2007, 151p.
16. Draft International Standard ISO/DIS 15390, Space Environment (Natural and Artificial) — Model of Radiation Impact by Galactic Cosmic Rays. International Organization for Standardization, NASA Engineering Standards Steering Council, 2003.
Available from: <<http://standards.gsfc.nasa.gov/reviews/iso-dis-15390/iso-dis-15390.pdf>>.
17. Burger R. A., M.S. Potgieter, B. Heber. Rigidity dependence of cosmic ray proton latitudinal gradients measured by the Ulysses spacecraft: Implications for the diffusion tensor, *J. Geophys. Res.*, 105 (A12), 2000, pp. 27447 – 27455.
18. Usoskin I.G., K. Alanko-Huotari, G.A. Kovaltsov, K. Mursula. Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951-2004, *J. Geophys. Res.*, 110(A12), 2005, pp. 108 – 117.
19. Hillas A.M. *Cosmic Rays*. Oxford, Pergamon Press, 1972, 297p.
20. Simpson J. A. Cosmic radiation: particle astrophysics in the heliosphere, in: *Frontiers in Cosmic Physics*, Mendell, R. B., Mincer, A.I. (Eds.), *Ann. N. York Acad. Sci.*, 655, 1992, pp. 95-137.
21. Press W.H., B.P. Flannery, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling. *Numerical Recipes in C++ - the Art of Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991, 1007p.
22. Stozhkov Y I. The role of cosmic rays in the atmospheric processes, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 29(5), 2003, pp. 11913 – 11923.
23. Clem J. M. et al. New calculations of the atmospheric cosmic radiation field-results for neutron spectra, *Radiation Protection Dosimetry*, 110(1-4), 2004, pp. 423 – 428.
24. Djemil T., R. Attallah, J. N. Capdevielle. Influence of the hadronic interaction model on the calculation of the atmospheric muon flux, in: *Proceedings of 20th European Cosmic Ray Symposium*, Portugal, 2006.
Available from: <<http://www.lip.pt/events/2006/ecrs/proc/ecrs06-s0-116.pdf>>
25. De Jager C., I. Usoskin. On possible drivers of Sun-induced climate changes. *J. Atm Solar Terr. Phys.*, 68 (18), 2006, pp. 2053 – 2060.
26. Velinov P.I.Y. et al. Method for calculation of ionization profiles caused by cosmic rays in giant planet ionospheres from Jovian group. *Adv. Space Res.*, 33 (2), 2004, pp. 232 - 239.
27. Velinov P.I.Y. Advancing our understanding of the cosmic ray processes that govern the solar influence on Earth and planets. *Sun and Geosphere*, 1 (1), 2006, pp. 5-7.
28. Velinov P.I.Y., L. Mateev. Improved cosmic ray ionization model for the system ionosphere–atmosphere. Calculation of electron production rate profiles, *J. Atm Solar Terr. Phys.*, 70 (2-4) , 2008, pp. 574 - 582.