Geomagnetic focusing of cosmic rays in the lower atmosphere - mechanism and evidence

Rumiana Bojilova[1], Natalya Kilifarska[1]

[1] National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography - Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev St., Bl. 3, Sofia 1113, Bulgaria; E-mail: rbojilova@geophys.bas.bg, nkilifarska@geophys.bas.bg

Key words: neutron monitors, spatial and seasonal variations of near surface particles' fluxes, longitudinal drift in heterogeneous geomagnetic field

Abstract
This paper shows that geomagnetic rigidity, and the elevation of measurement point, could not explain the irregularities found in the spatial distribution of annual mean cosmic radiation, detected by neutron monitors (NM). Theoretical analysis of the effect of heterogeneously distributed geomagnetic field reveals that its cross-longitudinal gradient could increase the showers of energetic particles in some regions and reduce it in others. We show that the NMs placed in regions with positive cross-longitudinal magnetic gradient detect a higher annual mean radiation dose, compared to those placed in regions with a zero, or a negative magnetic gradient.
Moreover, we found out that the shape of the NMs' seasonal variations is confined to geographic latitude, and covariate fairly well with the lower stratospheric ozone, with an opposite phase, however. This implies that the previously found relations – between near surface particles' flux and temperature of the 50÷100 hPa layer – more likely should be attributed to the seasonal variability of the ozone density at these levels, which in turn controls the temperature regime at many latitudes. The O3 variations itself are related to the production of ozone, activated by the lower energetic electrons in the near tropopause ionisation maximum (known as Regener-Pfotzer max). Furthermore, we speculate that the heavier O3 molecules could reduce the life time of π-mesons – increasing the probability for their nuclear catching, and consequently reducing the production of muons. Due to the fact that the muons are one of the main components of the CR secondary products, detected by the ground based neutron monitors, the lower stratospheric O3 density appears to influence the NMs' counting rates.

Геомагнитно фокусиране на Космичните Лъчи измерени при земята - механизми и доказателства

Румяна Божилова[1], Наталия Килифарска[1]

[1] Национален институт по геофизика, геодезия и география- БАН, ул. Акад. Г. Бончев бл. 3, София 1113, България; E-mail: rbojilova@geophys.bas.bg, nkilifarska@geophys.bas.bg

Ключови думи: неутронни монитори, пространствени и сезонни вариации на потока частици, близо до повърхността, дължинен дрейф в хетерогенното магнитно поле

Резюме
Настоящото изследване показва, че прага на отрязване и надморската височината на неутронния монитор не са в състояние да обяснят неоднородностите в пространственото разпределение на средногодишния интензитет на космичните лъчи, измерен на земната повърхност. От друга страна, теоретичният анализ на влиянието на пространствено нехомогенното геомагнитно поле показа, че съществуващият дължинен градиент може да увеличи потока от енергетични частици в отделни региони и да го намали в други. Настоящото изследване разкри, че неутронните монитори (НМ) намиращи се в райони с положителен дължинен магнитен градиент регистрират по-висока средногодишна доза радиация, в сравнение с НМ разположени в региони с нулев или отрицателен градиент. Освен това открихме, че формата на сезонните вариации на НМ зависи от географската ширина, изменяйки се синхронно с озона в ниската стратосфера, но в противофаза. Това предполага, че намерената в предишни изследвания връзка – между потока частици достигащи земната повърхност и температурата на слоя между 50-100hPa – вероятно се дължи на сезонната изменчивост в плътността на озона, която контролира температурния режим на тези нива. Вариациите на О3 от своя страна се дължат на въздействието на галактическите космични лъчи, които при определени условия генерират озон в максимума на йонизация в ниската стратосфера (познат като Regener-Pfotzer максимум).
За да обясним свързаността между озона и показанията на НМ, ние предполагаме, че по-тежките молекули на О3 могат да намалят времето на живот на π-мезоните – увеличавайки вероятността за взаимодействие с ядрата на по-тежките атмосферните молекули. Това означава, че вместо мюони, които са естествен продукт от разпадането на π-мезоните, се генерират други продукти, които не достигат до земната повърхност. И тъй като мюоните са един от основните компоненти на вторичната радиация (генерирана от космичните лъчи при взаимодействието им с атмосферата), които се регистрират от наземните НМ, това обяснява противофазната синхронизация между вариациите на озона и показанията на НМ.

Въведение

Потокът от космични лъчи (с галактичен или слънчев произход), достигащи до външната граница на земната магнитосфера, е приблизително хомогенен. Тези от тях, които навлизат в магнитосферата по отворените линии на магнитното поле, биват или отразени от геомагнитно поле в междупланетното пространство, или погълнати от атмосферата поради многобройните сблъсъци с атмосферни молекули. Частиците, които достигат затворените линии на геомагнитно поле, чиято енергия е недостатъчна за преодоляването му, биват захванати от него. Те са принудени от силата на Лоренц да се движат по спираловидна траектория около магнитните силови линии между Северното и Южното полукълбо. В допълнение захванатите от магнитното поле частици се движат и в направление перпендикулярно на магнитните силови линии, обикаляйки многократно планетата. Пълната обиколка около Земята, която правят те е от няколко минути, до няколко дни, в зависимост от енергията на частиците. Посоката на движение на протоните е на запад, докато тази на електроните - на изток.
Въпреки че времето на живот на захванатите частици може да бъде доста дълго (Selesnick et al., 2007; Lazutin, 2010), взаимодействието с магнитосферните неустойчивости, плазмени вълни и т.н., осигурява непрекъснато изсипване на захванати частици в по-ниската и по-плътна атмосфера. Сблъсквайки се с атмосферните молекули, първичните космични лъчи произвеждат вторични йони и електрони, както и различни продукти от ядрени реакции - някои от които имат висока проникваща способност и биват регистрирани от неутронни монитори на морско равнище. Ефективността на йонно-молекулните и ядрените реакции зависи от атмосферните характеристики като плътност, температура, влажност и т.н. Така преди повече от 70 години, учените са забелязали съществуващата връзка между показанията на неутронните монитори и температура, и налягането в ниската стратосфера (Duperier, 1941; 1949; Trefall, 1955; De Mendonça et al, 2013).
Освен от метеорологичните параметри, сезонната изменчивост на данните от неутронните монитори е повлияна и от пространствените вариации на геомагнитното поле Подробният анализ на годишната геомагнитна изменчивост, показва че само около 50% от нея може да се припише на външни фактори (Hakkinen et al., 2003). За останалите 50% авторите предполагат, че са свързани с пространственото разположение на анализираните станции по земното кълбо.
Тази статия изследва времевата и пространствена изменчивост в интензитета на космичните лъчи, измерена от 33 неутронни монитора, разположени в различни точки от земното кълбо. Намерените нееднородности (които са необясними в рамките на зависимостта от магнитния праг на отрязване и надморската височина) се интерпретират като ефект от модулацията на космичните лъчи от нехомогенното геомагнитно поле и влиянието им върху озона в ниската стратосфера.

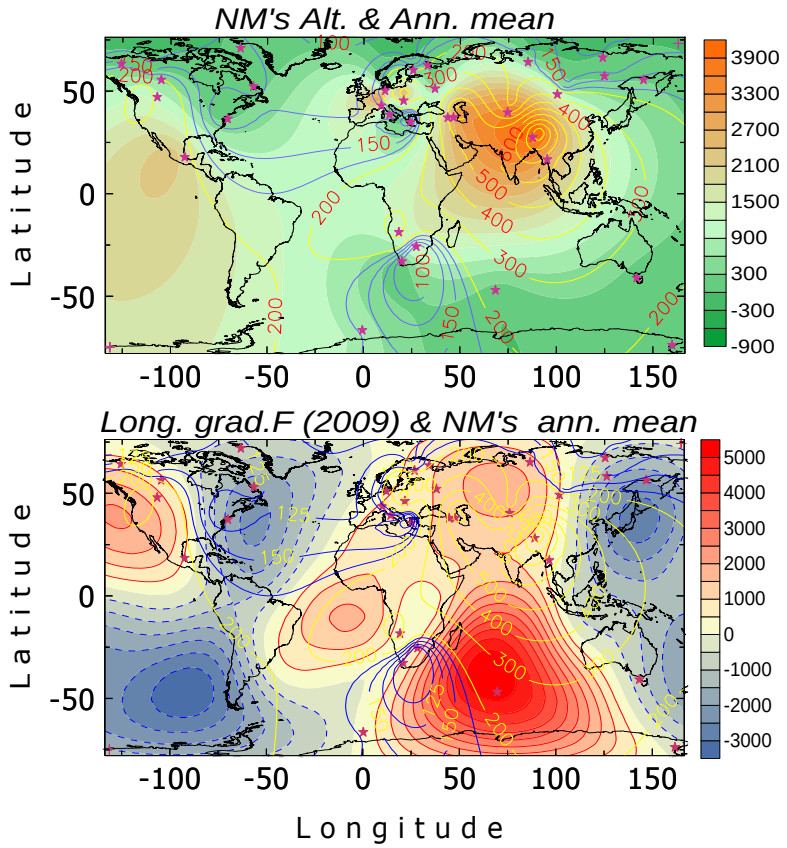
Данни и методи

Времевата и пространствена изменчивост на галактическите космични лъчи (ГКЛ) през 2009 г. е анализирана в 33 неутронни монитора със свободен достъпни до данните. Влиянието на налягането както и ефективността на неутронните монитори са отчетени в използваните от нас данни (любезно предоставени от IZMIRAN: http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm и NMDB портал: http://www01.nmdb.eu/).
Годината 2009 е избрана поради на настъпилия минимум в 24-тия слънчев цикъл. Това означава, че данните от неутронните монитори са по-малко повлияни от геомагнитните бури, индуцирани от слънчевата активност, броят на които е силно редуциран в периоди на спокойно Слънце. От друга страна, интензивността на пристигащите галактически космични лъчи е по-висока, защото по-малко на брой частици, достигащи до границата на хелиосферата, се отразяват обратно в космическото пространство от по-бавния, некомпресиран слънчев вятър. Следователно, ефектите от геомагнитните нееднородности, както и метеорологичните ефекти, могат по-лесно да бъдат открити в период на спокойно Слънце. За да оценим ефекта от геомагнитната хетерогенност върху интензитета на космическата радиация измерена на земната повърхност, ние анализирахме средногодишните стойности за всеки неутронен монитор за 2009 г. Анализът на времевата вариация беше направен след изваждането на годишното средно от всеки времеви запис. Изчислената разлика се нормира на средногодишна стойност, което позволява сравнение на сезонната изменчивост между различните неутронни монитори.

Анализ на средногодишните стойности на неутронните монитори

Според общо разбиране, доминиращата част от частиците, достигащи земната повърхност, навлизат в земната атмосфера по отворените магнитни силови линии. Това означава, че неутроните монитори

разположени в места с по-нисък праг на отрязване (т.е., в които заредените частици лесно преодоляват магнитната бариера) получават по-висока доза радиация от тези, разположени в райони с по-висок праг на отрязване). Освен това, интензитетът на потока частици зависи и от надморската височина на мониторинговата станция, защото само частици с много висока енергия са в състояние да проникнат дълбоко в атмосферата. За да разберем как тези противоречиви фактори влияят на пространственото разпределение на интензитета на частиците близо до повърхността, сме комбинирали две карти -едната, показваща надморската височина на неутронните монитори, а другата - средногодишната стойност на измерената радиация. Резултатът е представен на Фиг.1 (горния панел), която показва, че доминиращият фактор определящ интензивността на измерените частици, е надморската височина на неутронния монитор. Ясно се вижда, че в мониторите с по-висока надморска височина са измерени по-голям брой високо-енергетични частици.



Фигура 1. (цветно защриховане): Карта на надморската височина на неутронните монитори (горен панел) и дължинния градиент на геомагнитното поле – т.е. в направление перпендикулярно на меридианите (долен панел). Жълто-сините контури представят пространственото разпределение на средногодишните показания на неутронните монитори за 2009 г., построени въз основа на годишните стойности получени за всеки неутронен монитор.

От друга страна, сравнението на показанията на НМ-ри със сходна надморска височина, но с различен праг на отрязване (R) - разкриват някои неочаквани резултати. Така например, средногодишните импулси, измерени в Thule, Inuvik и Nain (всички с R = 0.3), са почти два пъти по-малки от измерените в Москва (R = 2.43) - виж Таблица 1. Също така, Таблица 1 показва, че интензитетът на частиците във Fort Smith (R = 0.3) е по-малък от този, измерен в станция със 7 пъти по-голям праг на отрязване - Magadan (R = 2.1), независимо от сходната им надморска височина. Аналогично, станциите Tixie Bay (R = 0.48) и Norilsk (R = 0.63) – намиращи се на морското равнище и с подобни географски ширини и праг на отрязване – отчитат съществено различни потоци частици (в Norilsk са много по-високи, отколкото в Tixie Bay).
Друг пример – изключение от традиционното схващане за определящата роля на височината на неутронните монитори и геомагнитния праг на отрязване – ни дава сравнението между африканските станции - Tsumeb (R = 9.15) и Potchefsroom (6.98). Таблица 1 показва, че интензивността на потока частици, измерена в станцията с по-ниска височина и с значително по-голям праг на отрязване, е почти 6 пъти по-висока. Подобна е ситуацията със станциите Kerguelen (R = 1.14) и Sinae (R = 0.73) – средногодишният поток частици в по- високо разположената станция, с по-нисък геомагнитен праг, е много по-слаб.
Тези и много други "отклонения" от общото разбиране за факторите, определящи интензивността на

частиците, достигащи до земната повърхност, предполагат съществуването на друг(и) фактор(и), влияещ(и) върху пространственото разпределение на интензитета на космичните лъчи достигащи земната повърхност. Един такъв фактор могат да бъдат частиците захванати в радиационните пояси на Земята. Следващият раздел ще опише възможния механизъм на такова влияние.

NM code	**Lat. [^{0}]**	**Long [^{0}]**	**Rigidity[GV]**	**Alt[m]**	**Ann. Mean**
ATHN	37.97N	23.78E	8.53	260	57.25152
HRMS	34.43S	19.23E	4.58	26	75.9217
NEWK	39.68N	75.75W	2.4	50	102.6935
TXBT	71.59N	128.78E	0.48	0	104.1229
YKTS	61.99N	129.7E	1.65	105	107.8079
OULU	65.05N	25.47E	0.81	15	113.405
DRBS	50.1N	4.59E	3.18	225	115.31
INUVIK	68.36N	133.72W	0.3	21	122.4717
IRKS	52.47N	104.03E	3.64	435	130.223
THULE	76.5N	68.7W	0.3	26	130.7371
NAIN	56.55N	61.68W	0.3	46	135.9816
FRSM	60.02N	111.93W	0.3	180	137.2711
MGDN	60.04N	151.05E	2.1	220	147.9627
ROME	41.86N	12.47E	6.27	0	158.1803
MCMU	77.9S	166.6E	0.3	48	174.7839
SNAE	70.17S	2.35W	0.73	856	178.7281
KIEL	54.34N	10.12E	2.36	54	180.407
NRLK	69.26N	88.05E	0.63	0	180.8299
APTY	67.57N	33.39E	0.65	181	185.5019
KGSN	42.98S	147.29E	1.88	65	219.3107
KERG	49.35S	70.25E	1.14	33	236.6656
MOSC	55.47N	37.32E	2.43	200	241.5492
PTFM	26.68S	27.09E	6.98	1351	59.36347
AANM	43.04N	76.94E	6.69	3340	167.3898
JUNG	46.55N	7.98E	4.49	3475	168.0818
MXCO	19.8N	99.18W	8.28	2274	232.7406
TSMB	19.2S	17.58E	9.15	1240	338.8673
CALG	51.08N	114.13W	1.08	1123	349.2115
LMKS	49.2N	20.22E	3.84	2634	471.998
NANM	40.37N	44.25E	7.1	2000	496.1897
PSNM	18.59N	98.49E	16.8	2565	620.3297
ARNM	40.47N	47.44E	7.1	3200	670.1337
TIBT	30.11N	90.56E	14.1	4300	3166.691

Таблица 1. Списък на анализираните неутронни монитори с техните географски координати, геомагнитна твърдост, надморска височина и средногодишна стойност на измерения поток космични лъчи.

Геомагнитно фокусиране на енергетични частици в ниската атмосфера

Геомагнитното поле е векторна сума от полето на дипол, недиполна част свързана с хетерогенната структура на вътрешността на Земята, магнитните свойства на скалите и магнитно поле от външни източници. Полученият вектор, измерен на земната повърхност, се различава съществено от диполното магнитно поле. В реалният геомагнитен вектор се наблюдава градиент в посока перпендикулярна на линиите на магнитното поле. Това означава, че при приближаването на частиците към земната повърхност

те започват да усещат магнитните неоднородности (особено в долната част на техните спирални траектории около линиите на магнитното поле). Това от своя страна влияе върху скоростта на дрейфа на частиците в направление перпендикулярно на магнитното поле, определян от формулата (1):

$$\mathbf{v}_{\text{drift}} = \frac{m}{q \cdot B^2}\left(v_{\perp}^2 \cdot \frac{\mathbf{B} \times \nabla \mathbf{B}}{2B} + v_{II}^2 \cdot \frac{\boldsymbol{\rho} \times B}{\rho^2} \right) \qquad (1)$$

където **B** е магнитният вектор, **ρ** - кривината на магнитните силови линии, v_{II} и $v_{\perp}$ са съответно скоростта успоредна на силовите линии и скоростта, перпендикулярна на линиите на магнитното поле; q и m са съответно заряда и масата на частиците. Първият израз в скобите съответства на магнитния градиент, перпендикулярен на линиите на магнитното поле, а вторият - на тяхната кривина. Тъй като дрейфа на частиците индуциран от градиента и кривината на магнитното поле зависи от заряда на частиците, той предизвиква разделяне на положителните и отрицателните заряди, генерирайки по този начин електрическо поле и следователно (ExB)/B^2 дрейф.

Наличието на недиполен магнитен градиент (в крос-меридионално направление) увеличава скоростта на движението на протоните на запад –особено в най-ниските части на тяхната спирална траектория около линиите на магнитното поле (виж формула 1). Следователно в районите със силно положителни дължинни градиенти (напр. Северозападна Америка и Източна Европа - Западна Азия) разделянето на зарядите и свързаното с тях електрическо поле ще изхвърли заредените частици в посока, перпендикулярна както на магнитното така и на електрическото полета, т.е. извън магнитния капан. Освен това тези частици взаимодействат с атмосферните молекули, създавайки вторични електрони, йони и ядрени продукти, което води до повишаване на йонизацията в ниската стратосфера както и до повишаване интензитета на космичната радиация регистрирана от неутронните монитори.

Обратно, в регионите с намаляващо магнитно поле (т.е Източна Америка-Атлантическия регион, Източна Азия-Западната част на Тихия океан и Южноатлантическата аномалия) скоростта на протонния дрейф ще отслабва. Това означава, че плазмата е по-здраво захваната към магнитните силови линии и по-малко на брой частици имат "шанса" да се освободят от влиянието на магнитното поле и респективно да предизвикат образуването на допълнително количество заредени частици и продукти от ядрен разпад. Следователно, в тези райони би могло да се очаква намаляване на космическата радиация, измервана от неутронните монитори.

Валидността на тези теоретични съображения е представена на долния панел на Фиг. 1, който сравнява картите на магнитен градиент в направление перпендикулярно на магнитната дължина (цветното защриховане) със средногодишните показания на неутронните монитори (контурните линии). Въпреки, че картата на интензитета на частиците близко до повърхността е доста груба (поради относително малкия брой неутронни монитори и тяхното неравномерно разпределение по земното кълбо), Фиг.1 показва, че занижени нива на измерената радиация се наблюдават в региони с отрицателен или нулев дължинен градиент на геомагнитното поле. Този ефект би могъл да бъде логично обяснение за по-големия интензитет на потока частици измерен в Москва – в сравнение с Inuvik, Tule, Nain и други съседи (Kiel, Oulu, Apatity). По подобен начин дозата, измерена в Norilsk и Irkutsk (разположени в регион с положителен дължинен градиент), е по-висока от тази, открита в Tixie Bay, Yakutsk и Magadan - разположени в регион с намаляващо (в направлението на навлизащите в атмосферата протони) магнитно поле .

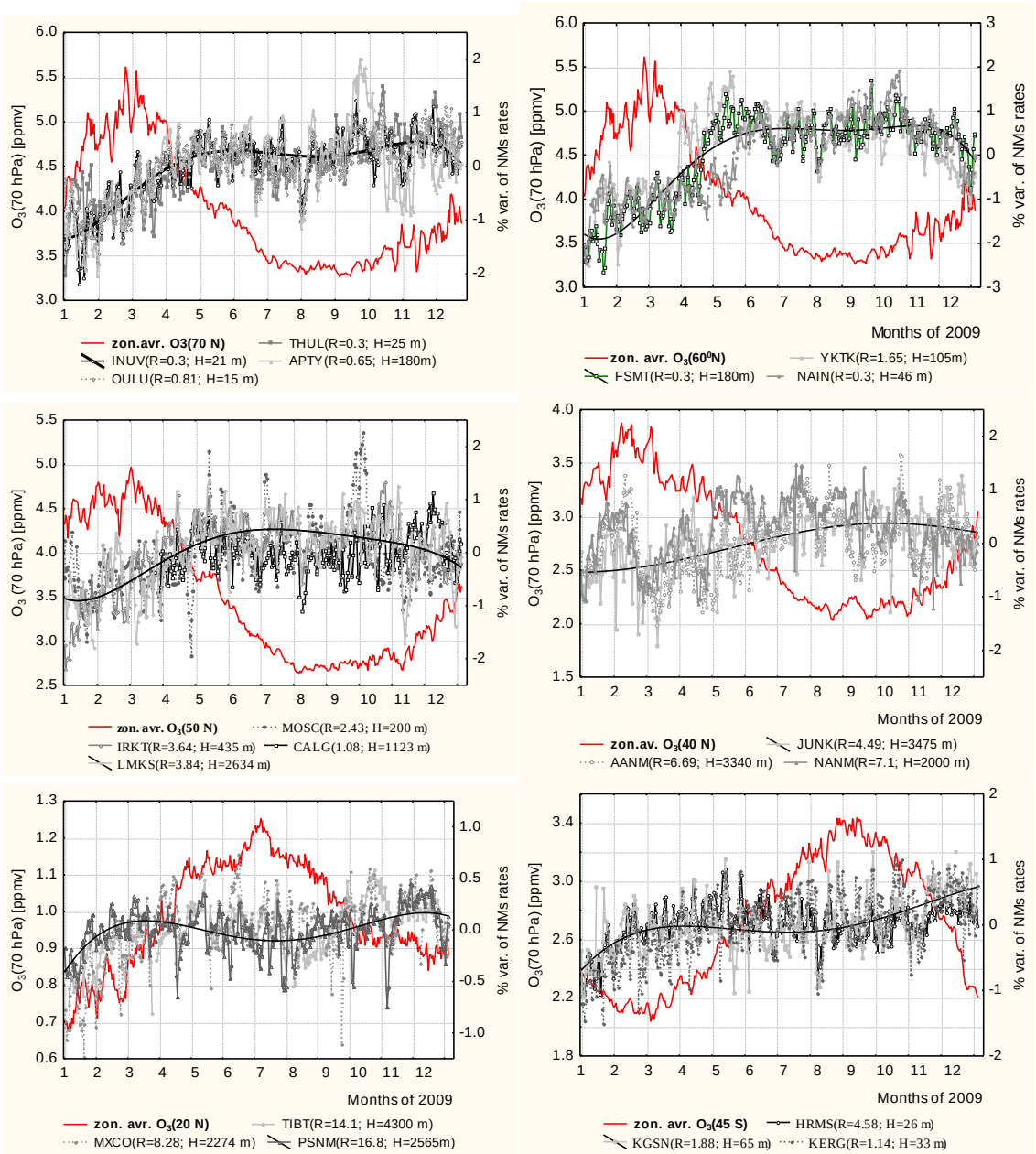
Пространствено разпределение на сезонните вариации на неутронните монитори

Освен средногодишните стойности, бяха анализирани и сезонните вариации на изследваните неутронни монитори. Различията между отделните станции са значителни и на пръв поглед без никаква закономерност. Подробния анализ показа, обаче, че формата на сезонната изменчивост зависи от географската ширина (вж. Фиг. 2). Този факт подсказва, че сезонните вариации са свързани по-скоро с метеорологични, отколкото с магнитни фактори. Тук е мястото да си припомним, че използваните данни са коригирани за влиянието на приземното налягане. Следователно, някакъв друг атмосферен ефект оказва влияние върху формата на сезонната вариация на НМ.

Междувременно, в средата на 20век е открита връзка между сезонните изменения в показанията на НМ и температурата (респективно налягането) между 50 и 100 hPa (Duperier, 1941; Trefall, 1955). Това е нивото, където се наблюдава максимум в концентрацията на π-мезони, получени от взаимодействието на първичните КЛ с атмосферата. Поради тази причина, Duperier (1948) предполага, че причината за

наблюдаваната свързаност между показанията на НМ и температурата на ниво 50-100 hPa са два конкуриращи се процеса: (1) радиоактивен разпад на π-мезоните до мюони; и (2) взаимодействие на π-мезоните с ядрата на атмосферните молекули и получаването на други продукти, които не достигат до неутронните монитори на земната повърхност.

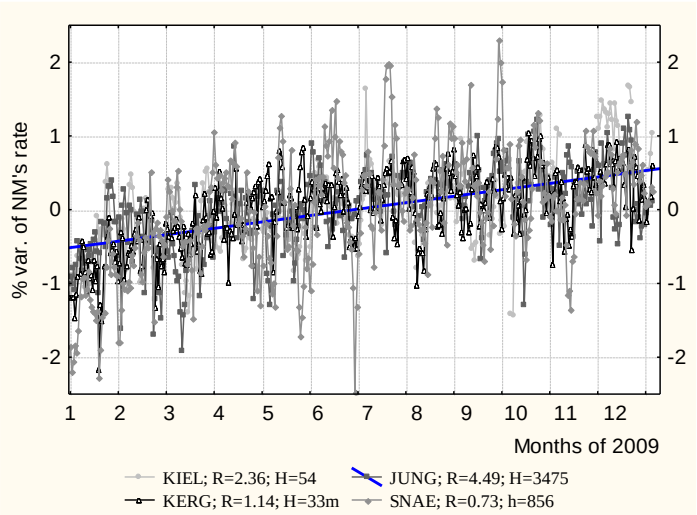
Сравнителния анализ, който направихме между показанията на неутронните монитори и температурата на ниво 70 hPa показа, че на географски ширини, където озонът контролира температурата на 70 hPa (т.е. между 40^0-10^0 с.ш. и 30^0-40^0 ю.ш.), както и в полярния район на южното полукълбо – температурата на 70 hPa и интензитета на космичните лъчи в близост до земната повърхността, се изменят синхронно, в противофаза. На други географски ширини, обаче, не се наблюдава систематична връзка между двете променливи.

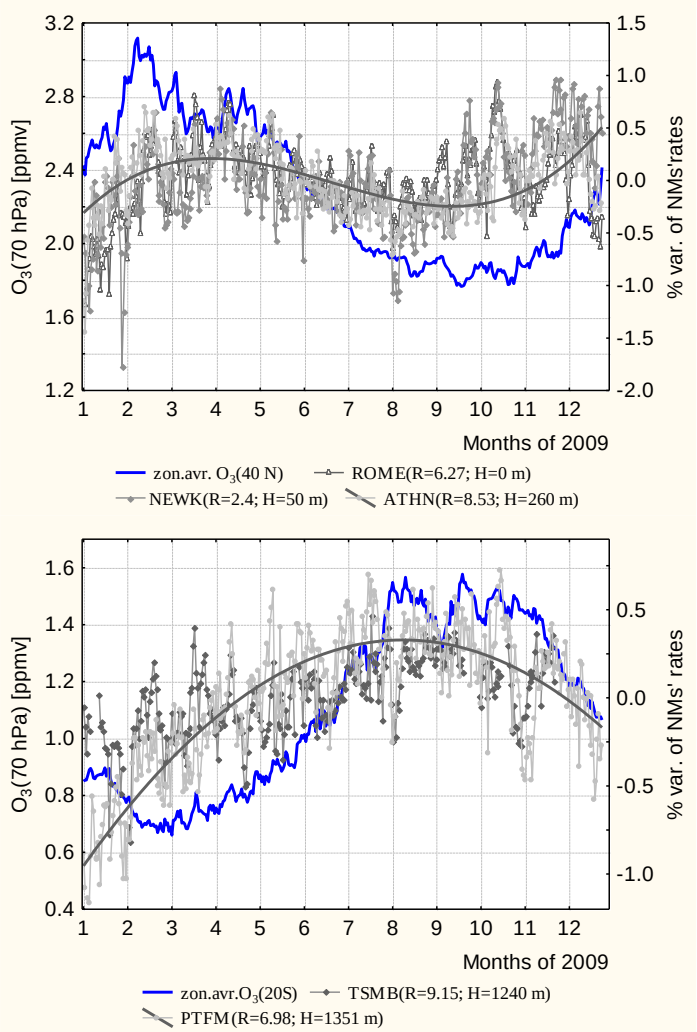


Фигура 2. Сезонни вариации на показанията на НМ (различните сиво-черни символи) и максималната йонизираща радиация на 70hPa (червеният контур), показани за различни географски ширини.

От друга страна, сравнението с O3 показва добре изразена анти-корелация (Фиг. 2).Този резултат предполага, че влиянието на ниската стратосфера върху показанията на неутронните монитори става не посредством влиянието на температурата върху продукцията на мюони, а по-скоро посредством влияние на химичния състав (в частност количеството молекули с по-големи ядра) върху продължителността на живот на π-мезоните. В тази връзка, последните изследвания показват, че при определени условия йонно-

молекулярните реакции, активирани от ниско-енергетичните електрони в Regener-Pfotzer максимума на йонизация, образуват озон в ниската стратосфера (Kilifarska, 2013; 2015). Другото критично условие, необходимо за активирането на продукцията на O3, е ниската атмосферна влажност. Последното изискване обикновено се изпълнява в зимната ниска стратосфера - на средни и високи ширини.
На фиг.2 се вижда добре, че през зимата, когато се повишава плътността на озона на 70 hPa се наблюдава добре изразено понижение в показанията на неутронните монитори (и в двете полукълба).
Този резултат ни дава основание да предположим, че повишената концентрация на по-тежката молекула на O3 ще увеличи честотата на стълкновение с π-мезоните (Peterson, 2010) и вместо мюони ще се образуват други продукти на ядрените взаимодействия. Следователно, намаленото количество на мюони ще бъде регистрирано от наземните НМ като понижение на потока космични лъчи. Обратно, намаляването на плътността на O3 би довело до удължаване времето на живот на π-мезоните, увеличавайки вероятността за радиоактивния им разпад до мюони. Този процес би следвало да доведе до ръст в показанията на НМ.
Тази хипотеза обяснява наблюдаваните сезонни вариации в преобладаващата част от изследваните НМ. Оказа се, обаче, че в някои от тях (Kiel, Tixie Bay, Sanae и Kingston) се наблюдава единствено положителен тренд (Фигура 3).
Характеристиките на тези монитори са доста различни – както по отношение на височината им над морското равнище, така и по отношение на геомагнитния праг на отрязване. Единствената прилика между тях е, че всички те са разположени в области с почти нулев дължинен градиент на геомагнитното поле (виж долния панел на Фиг.1). Височината на Regener-Pfotzer максимума на йонизация (и респективно на π-мезоните) в тези станции е разположена над 70 hPa. От това следва, че влиянието на озона върху времето на живот на π-мезоните е пренебрежима малко, което обяснява липсата на сезонна зависимост в станциите Kiel, Tixie Bay, Sanae и Kingston.
В друга група от неутронни монитори (Newark, Dourbes, Rome, Athens, Tsumeb and Potchefstroom) сезонната вариация в интензитета на космичните лъчи следва приблизително сезонната вариация на озона на 70hPa (Фиг. 3). Препратката към фигура1 показва, че тези неутронни монитори са също разположени в региони с почти нулев или с много малък дължинен градиент на магнитното поле. Височината на Regener-Pfotzer максимума както и на π-мезоните в тези станции е разположена под 70 hPa. Освен това за разлика от по-северните станции, където максимума на озоновия слой е разположен на ~70 hPa, на субтропични ширини той е вече на ~ 30 hPa. Това показва от една страна , че влиянието на озона върху трансформациите на π-мезоните е нищожно, а от друга, че и озона, и максимума на π-мезоните са повлияни от сезонната компресия (през зимата) и де-компресия (през лятото) на тропосферата и ниската стратосфера. Този процес е съпроводен с износ на по-тежки компоненти от ниските слоеве през лятото на нивото на π-мезонния максимум, които съкращават времето на живот на π-мезоните и намаляват вероятността за радиоактивния им разпад до мюони. През зимата се наблюдава обратния процес – увеличаване концентрацията на по-леки атмосферни компоненти (вследствие термичната компресия на тропосферата), съпроводено с увеличаване времето на живот на π-мезоните и нарастване на вероятността за радиоактивния им разпад до мюони.





Фигура 3. Сезонни вариации на неутронните монитори, разположени в региони с нулев или слабо отрицателен дължинен магнитен градиент.

Заключение

Анализът на средногодишните стойности на космичните лъчи за 2009 г., определен в 33 неутронни монитора, разположени в различни точки от земното кълбо, показва, че тяхното пространствено разпределение като цяло се определя от надморската височина на неутронния монитор. По-внимателен поглед обаче разкрива наличието на някои нееднородности, които не биха могли да бъдат приписани нито на височината, нито на геомагнитния праг на отрязване на неутронните монитори. Ние показваме, че тези нееднородности могат да бъдат обяснени посредством геомагнитното фокусиране на космичните лъчи в области с положителен дължинен градиент на геомагнитното поле.

Изследването на сезонната изменчивост на космичните лъчи, разкри зависимостта им от географската ширина. Сравнителният анализ на данните за атмосферния озон на 70 hPa и тези на неутронните монитори показа, че те се изменят синхронно във времето, но в противофаза. Този резултат ни дава основание да предположим, че откритата преди повече от 70 години свързаност между радиацията измервана от НМ и температурата на ниво 50-100 hPa се дължи по-скоро на вариациите в плътността на озона на тези нива. Последният влияе върху времето на живот π-мезоните и възможността за естественият им радиоактивен разпад до мюони. Например, повишаването на плътността на по-тежките озонови молекули увеличава вероятността за ядрено улавяне на π-мезоните, намалявайки по този начин производството на мюони. Обратно, намалената плътност на O3 увеличава времето на живот на π-мезоните, повишавайки вероятността за разпадането им до мюони. Мюоните имат силна проникваща способност (вследствие минималните им взаимодействия с молекулите на атмосферата), така че вариациите в тяхната концентрация се регистрира от наземните НМ като вариация в интензитета на космичните лъчи.

Благодарности:

Настоящото изследване е частично финансирано от Фонд Научни Изследвания, Проект ДН 14/1 от 11.12.2017. We acknowledge the NMDB database (www.nmdb.eu), founded under the European Union's FP7 programme (contract no. 213007), as well as the IZMIRAN neutron monitors data base (http://cr0.izmiran.ru/common/links.htm) for the data provided. Special thanks also to the project teams of ERA Interim reanalysis, providing gridded data for meteorological variables.

ЛИТЕРАТУРА

De Mendonça R.R.S., Raulin J.-P., Echer E., Makhmutov V.S., Fernandez G. (2013) Analysis of atmospheric pressure and temperature effects on cosmic ray measurements, J. Geophys. Res., **118**, 1403–1409, doi:10.1029/2012JA018026 doi:10.1029/2006SW000275.

Duperier A. (1941) The seasonal variations of cosmic-ray intensity and temperature of the atmosphere, Proc. R. Soc. Lond. A, **177**, 204-216, doi: 10.1098/rspa.1941.0007

Duperier A. (1949) The Meson Intensity at the Surface of the Earth and the Temperature at the Production Level, Proc. Phys. Soc. (A), **62**, 684-694.

Hakkinen L.V.T., Pulkkinen T.I., Pirjola R.J., Nevanlinna H., Tanskanen E.I., Turner N.E. (2003) Seasonal and diurnal variation of geomagnetic activity: Revised Dst versus external drivers, J. Geophys. Res., **108**(A2), 1060, doi:10.1029/2002JA009428

Kilifarska N.A. (2013) An autocatalytic cycle for ozone production in the lower stratosphere initiated by Galactic Cosmic rays, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, **66**(2), 243-252.

Kilifarska N.A.(2015) Bi-decadal solar influence on climate, mediated by near tropopause ozone, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **136**, 216-230. http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.005i

Lazutin, L.L. (2010) Belt of Protons 1–20 MeV at L = 2, Cosmic Research, **48**(1), 108–112.

Peterson R.J. (2010) Nuclear Fission Induced by Pi Mesons, Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, **11**(1), R1-R19.

Selesnick R.S., M.D. Looper, R.A. Mewaldt (2007) A theoretical model of the inner proton radiation beltp Space Weather, **5**, S04003.

Trefall H. (1955) On the Positive Temperature Effect in the Cosmic Radiation and the p-e Decay, Proc. Phys. Soc. (A), **68**, 893-904.