

СЕКЦИЯ 1

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГЕОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

НОВАЯ МЕТОДИКА ПОЛУЧЕНИЯ СПЕКТРОВ ПЕРВИЧНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНЫХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ A NEW METHODICS FOR DERIVING OF PRIMARY SPECTRA OF RELATIVISTIC SOLAR PROTON FLUXES VIA WORLDWIDE NEUTRON MONITOR NETWORK

Ю.В. Балабин, Э.В. Вашенюк

Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, balabin@pgia.ru

During hard solar flare cosmic ray flux ejects from the Sun into the space. The ejection produces increases on ground based cosmic ray detectors with energetic range up to 20 GeV. We developed a new advanced methodics to restore a primary energetic spectrum by solving the inverse problem. The methodics uses data of the worldwide neutron monitor network. The deriving spectra are compared to direct measures of complementary energetic interval on spacecrafts and balloons. The spectra could be useful to calculate atmosphere ionization, accepted radiation dose etc.

1. Солнечные космические лучи и методика решения задачи.

В околоземном пространстве наблюдаются события, когда в течение короткого времени происходит возрастание потока радиации по отношению к фону галактических космических лучей (ГКЛ). Эти возрастания регистрируются на поверхности земли различными приборами, имеют амплитуду до 5000 % (по сравнению с фоном), длительность от часа до нескольких суток, а энергетический спектр потока протонов простирается от десятка МэВ до десятков ГэВ. Источник этой дополнительной радиации находится на Солнце, отчего и названо явление солнечные космические лучи (СКЛ). СКЛ отличаются видом спектра и сильной анизотропией, тогда как поток ГКЛ в первом приближении изотропен. Мягкая часть СКЛ поглощается в атмосфере, повышая степень ионизации, жесткая часть может достигать поверхности земли. События, когда наблюдаются наземные возрастания от СКЛ, называются событиями GLE.

Нейтронный монитор (НМ) предназначен для постоянной регистрации потока космических лучей в глубине атмосферы. А распределенную по земному шару сеть НМ можно рассматривать как единый многонаправленный спектрометр для измерения характеристик потока СКЛ за пределами магнитосферы Земли. При этом характеристики релятивистских солнечных протонов (РСП): энергетический спектр, анизотропия и питч-угловое распределение определяются методами решения обратной задачи (оптимизации): минимизации разности модельных откликов нейтронных мониторов с наблюдаемыми значениями [1, 2]. Именно сильная анизотропия СКЛ приводит к тому, что данные не менее чем 20-25 станций нейтронных мониторов необходимы для такого анализа. Если характеристики РСП определены в последовательные моменты времени, можно проследить их динамику во время события GLE, а также построить расчетный профиль изменения потока СКЛ для любого места на Земле.

Так как Земля окружена магнитосферой, движение заряженных частиц в ней существенно искажается, и чтобы определить направления, из которых данная станция принимает радиацию, нужно вычислить ее асимптотический конус приема во всем диапазоне энергий. Это возможно выполнить только численным моделированием движения частиц разной энергии от границы атмосферы до границы магнитосферы. Для того, чтобы приступить к решению обратной задачи (оптимизации), необходимо провести вышеперечисленные операции с хорошей точностью, так как от точности их выполнения сильно зависит точность окончательных результатов. Подробно методика описана в [3].

В отличие от большинства предыдущих методик решения обратной задачи в СКЛ, нами применен метод двух длин пробегов Каминера [4] при вычислении барометрического эффекта в СКЛ. Для расчета асимптотических конусов станций используются современные модели магнитосферы Цыганенко Т-01 и Т-03, шаг расчета 0.001 ГВ. Такой мелкий шаг позволяет обойтись без вычисления эффективных значений пенумбры, которые дают заметный вклад в ошибку. Нами разработана новая модель приема радиации НМ из всей верхней полусферы, а не только вертикально падающий поток. Использование в оптимизации удельной функции сбора Дебруннера [5] позволяет получать решение в абсолютных единицах – протон /(m^2 с стер ГэВ) и непосредственно сравнить результат с прямыми измерениями спектра в смежном энергетическом интервале, сделанных с помощью шаров-зондов и на космических аппаратах.

Итак, отклик станции НМ на анизотропный поток СКЛ запишется в виде

$$G(J_0, \gamma, \Delta\gamma, c, \Theta, \Phi) = \sum_L \left(\Delta N_L(J_0, \gamma, \Delta\gamma, c, \Theta, \Phi) - DN_L \right) \quad (1)$$

где $\Delta N_L(J_0, \gamma, \Delta\gamma, c, \Theta, \Phi)$ – расчетное возрастание на L-ой станции, обусловленное потоком СКЛ на границе магнитосферы с параметрами $(J_0, \gamma, \Delta\gamma, c, \Theta, \Phi)$; $G(J_0, \gamma, \Delta\gamma, c, \Theta, \Phi)$ – минимизируемая функция, а DN_L – реально наблюдавшееся возрастание на L-ой станции. При этом параметры, описывающие поток СКЛ, суть следующее: J_0 – поток протонов через единичную площадку с единичной энергией; γ – показатель спектра; $\Delta\gamma$ – спектральная поправка, c – ширина питч-углового распределения; Θ и Φ – углы (широта и долгота в системе GSE), задающие направление оси анизотропии потока СКЛ. При этом расчетное возрастание на L-ой станции определяется как:

$$\Delta N_L(J_0, \gamma, \Delta\gamma, c, \Theta, \Phi) = \sum_{R=1}^{20} J_0 R^{\gamma + \Delta\gamma(R-1)} \exp\left(\frac{-\theta_L(R)^2}{c}\right) S(R) A_L(R) dR \quad (2)$$

где $R^{\gamma + \Delta\gamma(R-1)}$ – общая форма задания спектра РСП, $S(R)$ – удельная функция сбора, $A_L(R)$ – величина, характеризующая разрешенные и запрещенные траектории в магнитосфере для L-ой станции, выражение $\exp(-\theta(R)^2/c)$ задает питч-угловое распределение, в нее в неявной форме входят величины Θ и Φ , R – жесткость частицы, dR – шаг по жесткости при вычислении.

Современные численные методы и вычислительные мощности позволяют вполне уверенно провести поиски минимума функции G и за приемлемый интервал времени получить решение. Более того, возможно выполнить оптимизацию событий GLE с шагом в 5 минут и проследить динамику параметров потоков СКЛ в течение всей длительности GLE. По завершении оптимизации результаты переводятся в привычную энергетическую шкалу, при этом спектральная функция имеет аналитический вид: спектр с переменным наклоном описывается экспоненциальной зависимостью:

$$I(E) = J_0 \exp(-E / E_0) \quad (3)$$

а степенной спектр

$$I(E) = J_1 E^\gamma \quad (4)$$

2. Примеры использования методики

По данной методике обработаны были все значительные события GLE, зарегистрированные с начала наблюдений космических лучей. Таких событий около четырех десятков. В большинстве событий имеются данные прямых измерений спектра в смежном энергетическом интервале; сравнение полученных в ходе оптимизации спектров с данными прямых измерений показывает хорошее согласие расчетных и измеренных спектров. В качестве иллюстрации результатов и демонстрации возможностей методики приведем два примера.

Событие 4 мая 1960 года (GLE 08).

Событие GLE 08 отличается большой амплитудой при малой длительности. А полученные спектры на протяжении большей части времени имеют экспоненциальную форму. На рис.1 приводятся для примера профили возрастных и вычисленные асимптотические конусы приема станций. На профилях отмечены стрелками моменты времени, для которых на рис.2 приведены спектры РСП и питч-угловое распределение. На карте конусов знаком "+" показано положение оси анизотропии, а тонкими линиями – изогоны равных питч-углов. Во время GLE 08 были проведены прямые измерения потока РСП в стратосфере на шарах-зондах. Прямые измерения спектра хорошо согласуются с вычисленными (рис.2а).

Событие 20 января 2005 года (GLE 69)

Событие GLE 69 является вторым по величине амплитуды возрастных за всю историю наблюдений. (На первом месте находится GLE 05 с амплитудой 5400 %.) Во время GLE 69 были выполнены прямые измерения потока РСП на шарах-зондах и на космическом аппарате GOES-11. Отметим, что GLE 69 имело на стадии роста и максимума редкую особенность – двунаправленную анизотропию: поток состоял из двух частей (**Ia** и **Ib**), каждая из которых характеризовалась своими параметрами спектра.

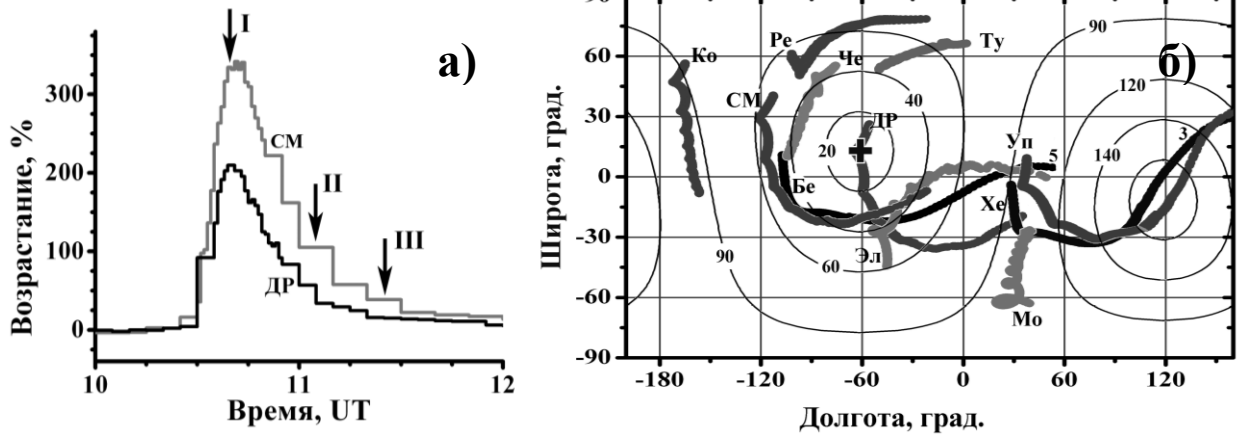


Рис. 1. а — профили возрастных на станциях: СМ — Сульфур Маунтин, ДР — Дип Ривер. Стрелками отмечены моменты времени определения параметров РСР; б — карта асимптотических конусов станций: Ко — Колледж, СМ — Сульфур Маунтин, Ре — Резольют, Бе — Беркли, Че — Чёрчилл, ДР — Дип Ривер, Эл — Элворт, Ту — Туле, Уп — Уппсала, Хе — Херстмонсо, Мо — Моусон. Линии равных питч-углов показаны относительно определенной в ходе оптимизации оси анизотропии для 11:05 UT.

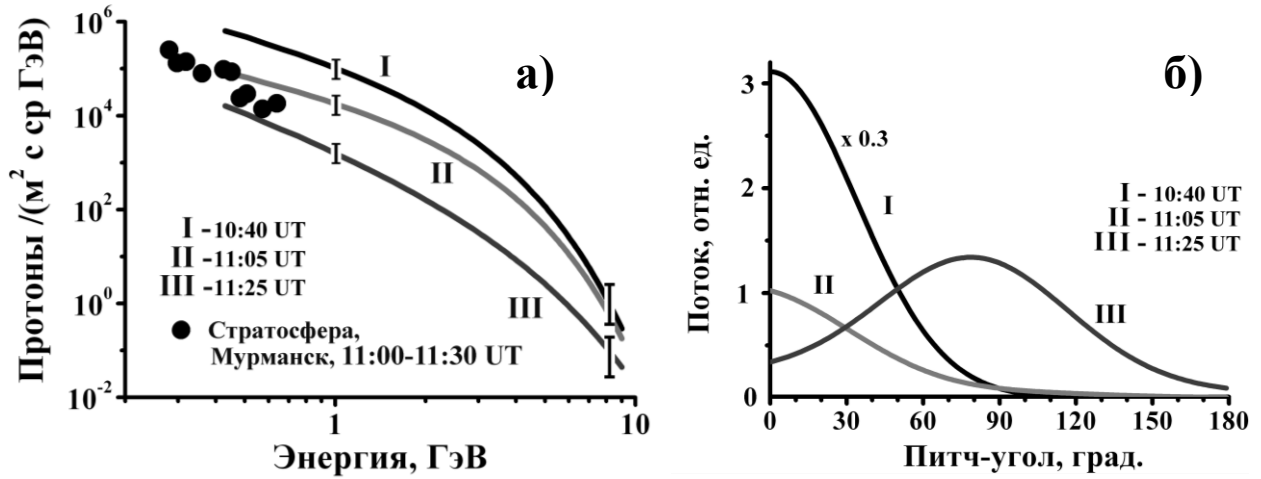


Рис. 2. а — Энергетические спектры РСР, полученные по данным сети НМ для указанных моментов времени; б — питч-угловое распределение потока РСР.

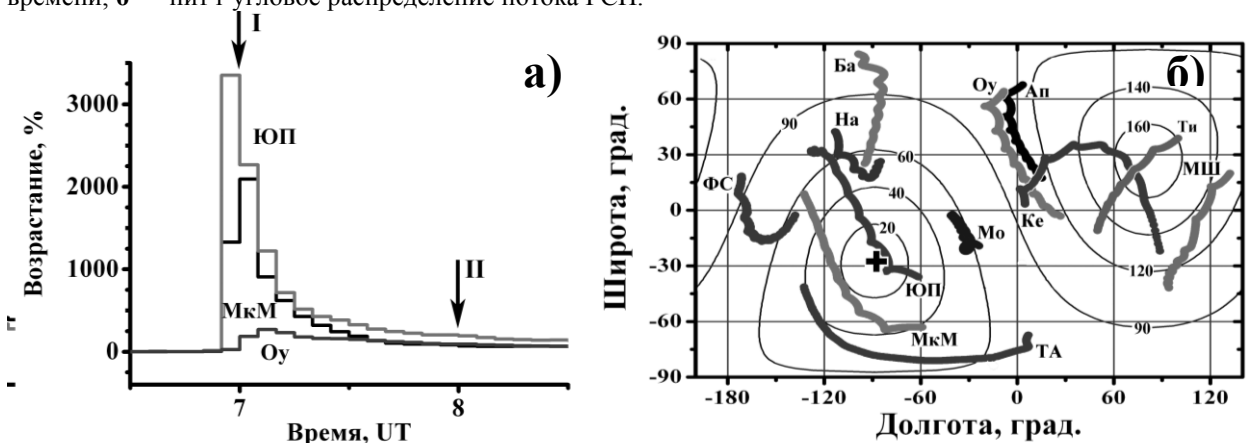


Рис. 3. а — профили возрастных на станциях: ЮП — Южный Полюс, МкМ — Мак-Мёрдо, Оу — Оулу. Стрелками отмечены моменты времени определения параметров потока РСР; б — карта асимптотических конусов станций (GSE коорд.): ФС — Форт Смит, На — Наин, Ба — Баренцбург, ЮП — Южный Полюс, МкМ — Мак-Мёрдо, Мо — Моусон, Оу — Оулу, Ап — Апатиты, Ке — Кергелен, ТА — Терре Адели, Ти — Тикси, МШ — мыс Шмидта. Линии равных питч-углов показаны относительно определенной в ходе оптимизации оси анизотропии для 07:00 UT (+).

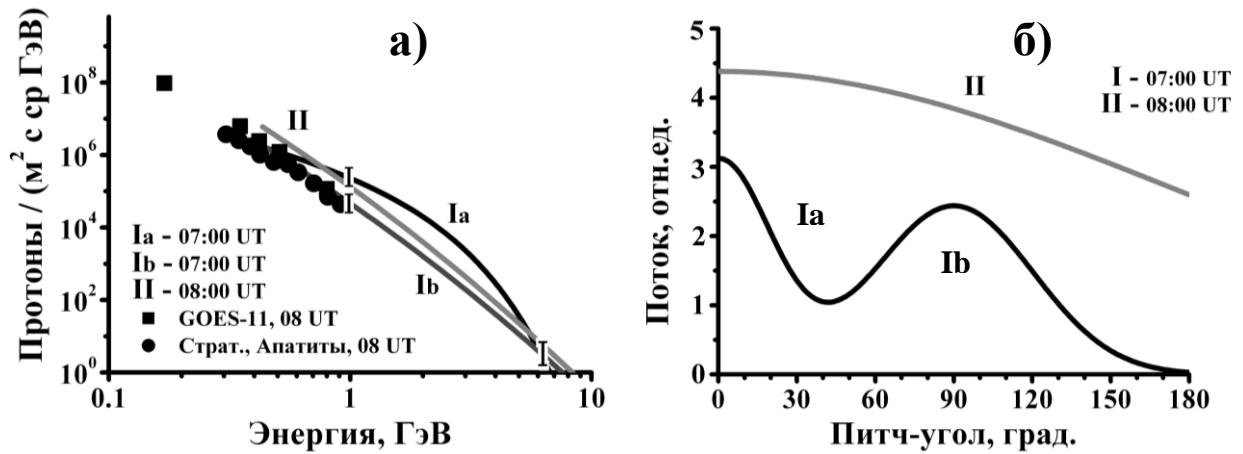


Рис. 4. а — Энергетические спектры РСРП, полученные по данным сети НМ для указанных моментов времени; б — питч-угловое распределение потока РСРП.

В таблице представлены результаты обработки значительных событий GLE. В колонках "Компонента 1" даются величины для задания спектра по формуле (3), а в "Компоненте 2" приводятся значения для (4). Естественно, эти спектры существуют в разное время в событии.

№	№ GLE	Дата события	Гелио-координаты	Тип вспышки	Ампл. возрастания %	Компонента 1		Компонента 2	
						J_0	E_0	J_1	$-\gamma$
1	05	23.02.1956	N23W80	3B	5400	$7.4 \cdot 10^5$	1.37	$5.5 \cdot 10^5$	4.6
2	08	04.05.1960	N13W90	3B	335	$6.6 \cdot 10^4$	0.67	$1.6 \cdot 10^3$	4.2
3	31	07.05.1978	N23W82	1B/X2	208	$3.5 \cdot 10^4$	1.11	$1.3 \cdot 10^4$	4.0
4	38	07.12.1982	S19W86	1B/X2.8	37	$5.7 \cdot 10^3$	0.65	$7.2 \cdot 10^3$	4.5
5	39	16.02.1984	- W132	-	95	-	-	$5.2 \cdot 10^4$	5.9
6	42	29.09.1982	- W105	- /X9.8	260	$1.5 \cdot 10^4$	1.74	$2.5 \cdot 10^4$	4.1
7	44	22.10.1989	S27W31	2B/X2.9	154	$7.5 \cdot 10^4$	0.91	$1.5 \cdot 10^4$	6.1
8	47	21.05.1990	N35W36	2B/X5.5	20	$6.3 \cdot 10^3$	1.13	$2.7 \cdot 10^3$	4.3
9	55	06.11.1997	S18W63	2B/X9.4	11	$8.3 \cdot 10^3$	0.92	$8.2 \cdot 10^3$	4.6
10	59	14.07.2000	N22W07	3B/X5.7	40	$3.3 \cdot 10^5$	0.50	$5.0 \cdot 10^4$	5.4
11	60	15.04.2001	S20W85	2B/X14.4	120	$1.3 \cdot 10^5$	0.62	$3.5 \cdot 10^4$	5.3
12	65	28.10.2003	S16E08	4B/X17.2	27	$1.2 \cdot 10^4$	0.60	$1.5 \cdot 10^4$	4.4
13	67	2.11.2003	S14W56	2B/X8.3	16	$4.6 \cdot 10^4$	0.51	$9.7 \cdot 10^3$	6.3
14	69	20.01.2005	N14W61	2B/X7.1	4300	$2.5 \cdot 10^6$	0.49	$7.2 \cdot 10^4$	5.6
15	70	13.12.2006	S06W24	2B/X3.4	95	$3.5 \cdot 10^4$	0.59*	$4.3 \cdot 10^4$	5.7

* - среднее значение, спектр не точно соответствует экспоненциальной зависимости.

Заключение

Разработана новая методика решения обратной задачи: восстановления первичного спектра СКЛ по данным наземных измерений сети нейтронных мониторов. Методика использует современные модели магнитосферы и точно учитывает поток радиации на НМ со всей небесной полусферы. Методика дает абсолютные значения спектра, падающего на магнитосферу. Спектры верифицированы прямыми измерениями в смежном энергетическом интервале. Спектры могут быть использованы при расчетах дополнительной ионизации и проводимости атмосферы при событиях GLE, вычисления поглощенных доз радиации на всех высотах в любой точке земного шара.

Литература

- Smart D.F., Shea M.A Theoretical response of the Deep River neutron monitor to an anisotropic solar cosmic ray event: Preprint AFCRL-72-0456, Belford MA, USA, 1972.
- Cramp J.L., Duldig M.L., Flueckiger E.O., et al. The October 22, 1989, solar cosmic ray enhancement: An analysis of the anisotropy and spectral characteristics // J. Geophys. Res. – 1997, V.102, A11. P.24237-24248.
- Балабин Ю.В. Автореферат канд. диссертации "Динамика релятивистских солнечных космических лучей по измерениям на уровне земли". М, ИЗМИРАН 2008. 18 с.
- Каминер Н.С. Об учете барометрического эффекта нейтронной компоненты во время вспышек космических лучей // Геомагнетизм и Аэронавигация. 1967, Т.7, N 5. С.806-809.
- Debrunner H., Flueckiger E., Lockwood J.A. Response of Neutron Monitors to Solar Cosmic Ray Events // 8th European Cosmic Ray Symposium, Rome, 1984, Book of abstracts.