

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.130-133

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГУЛЯРНОГО БАЛЛОННОГО МОНИТОРИНГА ГКЛ И ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ PAMELA И AMS-2

М.Б. Крайнев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия; e-mail: mkrainev46@mail.ru

Аннотация. Результатом регулярного баллонного мониторинга (РБМ) космических лучей в атмосфере Земли является один из наиболее длинных рядов однородных измерений характеристик галактических космических лучей (ГКЛ) в Мурманской и Московской областях с 1957 г. и в обл. Мирный (Антарктида) с 1962 г. Однако, ряды данных как РБМ, так и хорошо известного нейтронного мониторинга космических лучей относятся к скоростям счёта детекторов вторичных космических лучей и, чтобы использовать их для сравнения с результатами измерений или расчётов ГКЛ в гелиосфере, необходимо откалибровать эти скорости счёта в терминах интенсивности первичных ГКЛ около Земли. В статье некоторые ожидаемые из эксперимента РБМ характеристики ГКЛ сравниваются с результатами прямых измерений в экспериментах PAMELA (06.2006-01.2016 гг.) и AMS-2 (05.2011- по н./вр.). Оценены коэффициенты перехода от интегральных интенсивностей протонов, определённых по данным РБМ, к тем же характеристикам, измеренным в экспериментах PAMELA и AMS-2. Обсуждаются пути уточнения полученных связей, а также делается вывод, что для улучшения понимания связи результатов РБМ с характеристиками первичных ГКЛ могут быть полезны расчёты каскада космических лучей в атмосфере.

1. Введение

Для исследования процесса распространения ГКЛ в гелиосфере очень важно наличие данных наблюдений их интенсивности. Наиболее длительные ряды результатов таких наблюдений существуют для района орбиты Земли, причём в течение долгого времени (для низких энергий - до начала 1970-х годов) систематические измерения проводились лишь на поверхности Земли (нейтронные мониторы, мюонные телескопы) и в атмосфере (регулярный баллонный мониторинг, РБМ). В этих экспериментах регистрируются в основном вторичные космические лучи и существуют определённые процедуры для связи скоростей счёта детекторов этих экспериментов и интенсивности первичных ГКЛ вне земной магнитосферы. Ясно, что для верификации этих процедур требуется сопоставление результатов косвенных и прямых характеристик ГКЛ в соответствующих диапазонах энергии.

Однако условия для такого сопоставления в течение долгого времени не было, т.к. отсутствовали однородные данные интенсивности первичных ГКЛ в широком диапазоне энергии. Лишь после публикации данных эксперимента PAMELA в 06.2006 – 01.2014 гг., а затем AMS-2 (05.2011 – 05.2017 гг.), такие условия появились.

В статье сопоставляются некоторые характеристики интенсивности ГКЛ, определённые по результатам эксперимента РБМ, с прямыми измерениями этих характеристик в экспериментах PAMELA и AMS-2. Оценены коэффициенты перехода от интегральных интенсивностей протонов, определённых по данным РБМ, к тем же характеристикам, измеренным в экспериментах PAMELA и AMS-2. Обсуждается надёжность полученных связей и пути её повышения.

2. Эксперимент РБМ и метод получения из него оценки данных об интенсивности ГКЛ

В эксперименте РБМ, проводимом в настоящее время в трёх пунктах (Апатиты, Долгопрудный, обл. Мирный (Антарктида)) и достаточно подробно описанном в работах [1, 2], за каждый месяц с 07.1957 г. (в Мурманской области и в Долгопрудном) и с 1962 г. в обл. Мирный определяется т.н. высотная кривая $N_1(X, R_c, t)$ - зависимость скорости счёта N_1 счетчика Гейгера от количества вещества X в вертикальном столбе воздуха над прибором в пункте с вертикальной жёсткостью геомагнитного обрезания R_c в момент времени t .

При достаточной высоте подъёма зонда можно провести экстраполяцию $N_1(X)$ к границе атмосферы ($X = 0$ г/см²) и оценить интегральную интенсивность протонов первичных ГКЛ $J_1^{RBM}(T > T_c)$ на широте пункта измерения в магнитосфере Земли (характеризующейся жёсткостью обрезания R_c , соответствующей энергии протонов T_c). Так как условия для проведения экстраполяции к границе атмосферы существуют далеко не всегда, а скорость счёта N_{1m} в максимуме высотной кривой определяется наиболее просто и надёжно, можно рассмотреть регрессию между $J_1^{RBM}(T > T_c, t)$ и $N_{1m}(t)$. Знание коэффициентов этой регрессии даёт

возможность оценить характеристики $J_1^{RBM}(T > T_c, t)$ первичных ГКЛ за всё время проведения РБМ. В работе [3] приведены результаты описанного анализа данных РБМ до 2005 г.

Таким образом, существует оценка $J_1^{RBM}(T > T_c)$ и аналогичные оценки других характеристик (см. [3]) первичных ГКЛ в гелиосфере в районе орбиты Земли, которые получены по данным только эксперимента РБМ и должны быть проверены по данным прямых измерений ГКЛ в гелиосфере около Земли.

3. Данные экспериментов PAMELA и AMS-2 в сравнение с данными РБМ

В эксперименте PAMELA наряду с другими результатами определены спектры первичных протонов ГКЛ в широком диапазоне энергии ($96 < T, \text{ МэВ} < 43000$) за период 07.2006 – 01.2014 гг., усреднённые за кэррингтоновский оборот Солнца [4, 5], что позволяет провести за этот период их сравнение со среднемесячными оценками характеристик первичных ГКЛ по данным РБМ. Данные PAMELA по дифференциальной интенсивности протонов с ($96 < T, \text{ МэВ} < 43000$) позволяют легко рассчитать необходимые для указанных сравнений интегральные интенсивности. В эксперименте AMS-2 спектр протонов ГКЛ определён для $R > 1 \text{ ГВ}$ ($T > 433 \text{ МэВ}$) и опубликован за 05.2011 – 05.2017 гг. в [6], а для вычисления требуемых интегральных интенсивностей мы привлекли данные экспериментов CRIS/ACE и IMP-8.

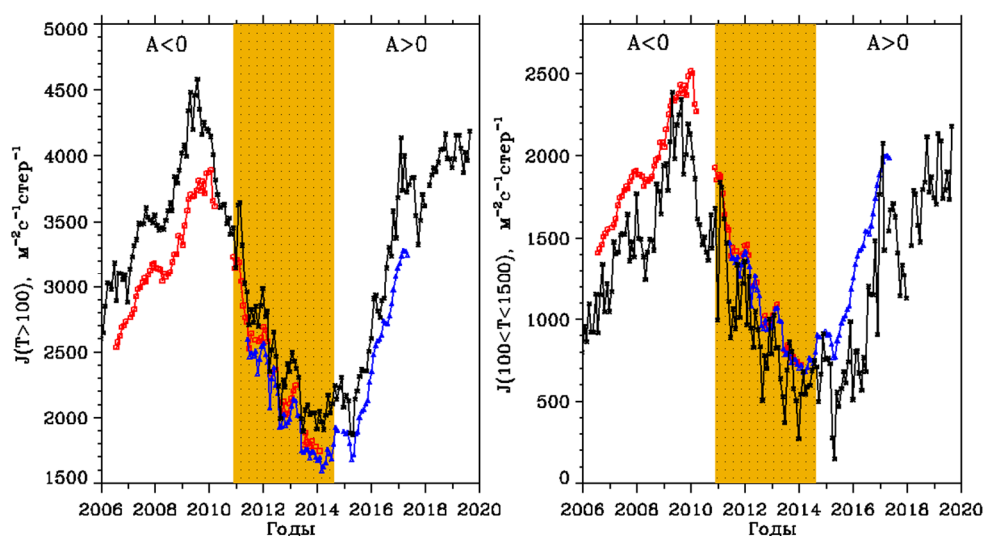


Рисунок 1. Интегральные интенсивности протонов ГКЛ $J(100 < T)$ (левая панель) и $J(100 < T < 1500)$ (правая панель, где T – энергия в МэВ, оценённые по данным эксперимента РБМ (черные кривые, звёздочки)) и по результатам измерений протонов ГКЛ в экспериментах PAMELA (красные кривые, квадраты) и AMS-2 (синие кривые, треугольники). Вертикальные полосы обозначают период инверсии гелиосферного магнитного поля, а полярность поля до и после этого периода указаны в верхних частях панелей.

На Рис. 1 сравнивается поведение в 2006 – 2017 гг. интегральных интенсивностей протонов ГКЛ $J(100 < T)$ и $J(100 < T < 1500)$, оцененных по данным РБМ, с этими же характеристиками, определёнными по данным PAMELA и AMS-2. Видно, что соответствие характеристик, оцененных по данным РБМ и определённых по данным космических аппаратов, лучше для $J(100 < T)$, чем для $J(100 < T < 1500)$. Однако и для интегральной интенсивности протонов ГКЛ $J(100 < T)$ оценка по данным только скорости счёта одиночного счётчика в максимуме высотной кривой в Апатитах систематически превышает эту интенсивность, определённую по данным PAMELA (примерно на 10 % в 2006-2010 гг.) и AMS-2 (примерно на 10 % в 2015-2017 гг.).

На Рис. 2-5 приведены результаты регрессии между характеристиками ГКЛ, определёнными по данным РБМ и измеренными в экспериментах PAMELA и AMS-2. Как видно из данных рис. 2, линейная регрессия интегральной интенсивности $J(100 < T)$, оцененной по данным РБМ, к определённой по данным PAMELA в 2006-2013 гг. (с коэффициентами регрессии $A = 302.8 \pm 55.0$, $B = 0.820 \pm 0.018$) приводит к высокой корреляции ($\rho=0.982$) между рядами. Рис. 3 демонстрирует аналогичную высокую корреляцию ($\rho=0.984$) интегральной интенсивности $J(100 < T)$, оцененной по данным РБМ и приведённой по линейной регрессии (с коэффициентами регрессии $A = 66.3 \pm 46.0$, $B = 0.845 \pm 0.018$) к данным AMS-2 в 2011-2017 гг., с последней. Что касается интегральной интенсивности протонов ГКЛ $J(100 < T < 1500)$, на правой панели Рис.2 прежде всего обращает на себя внимание значительно большая вариабельность этой интенсивности по данным РБМ, чем по данным как PAMELA, так и AMS-2. Это проявляется и в большем разбросе регрессионных зависимостей

на правых панелях Рис. 4 и 5, чем Рис. 2 и 3, и в коэффициентах регрессии и корреляции: $A = 302.8 \pm 55.0$, $B = 0.99 \pm 0.04$, $\rho=0.949$ для Рис.4 и $A = 421.4 \pm 63.4$, $B = 0.85 \pm 0.07$, $\rho=0.812$ для Рис. 5.

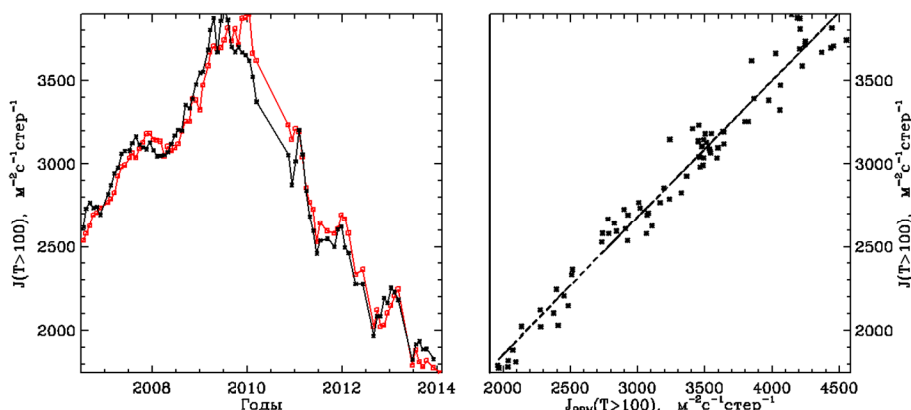


Рисунок 2. Левая панель – временной ход интегральной интенсивности $J(100<T)$ в 2006-2013 гг., определённой по данным PAMELA (J^{PAM} , красная кривая, квадраты), и по данным эксперимента РБМ, приведённым к J^{PAM} по линейной регрессии $J^{PAM} = A+B \cdot J^{RBM}$. Правая панель – корреляция между J^{PAM} и приведённой к ней J^{RBM} .

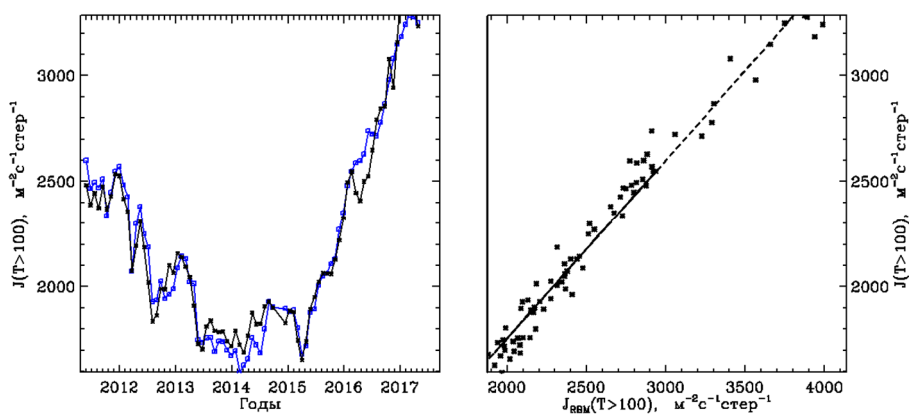


Рисунок 3. То же, что на рис. 2, но по данным РБМ и AMS-2 (синяя линия, квадраты) в 2011-2017 гг.

4. Обсуждение полученных связей и перспективы их изучения

В принципе, зная связь между максимальными скоростями счёта детекторов РБМ и оцененными по данным РБМ характеристиками ГКЛ [3] и получив в данной работе связь между этими оценками и теми же характеристиками ГКЛ, полученными по прямым измерениям, можно уточнить предложенную в [3] связь. Однако мы считаем, что сначала надо проанализировать и, возможно, усовершенствовать методику определения в эксперименте РБМ максимальной интенсивности счёта детекторов. Возможно, именно с погрешностью этой методики связана слишком большая вариабельность от месяца к месяцу интегральной интенсивности протонов ГКЛ $J(100<T<1500)$, оцениваемой по разности максимальной скорости счёта одиночного счётчика РБМ в двух пунктах проведения РБМ.

Кроме того, как видно из Рис. 1, весь анализируемый в данной работе период времени, 2006-2017 гг., делится на три сопоставимых части периодом инверсии ГМП. Период отрицательного ($A<0$) ГМП, 07.2006-11.2010 гг., покрыт данными PAMELA. В период инверсии ГМП, 11.2010-08.2014 гг., проводились измерения как PAMELA, так и AMS-2, Наконец, в период положительного ($A>0$) ГМП, 08.2014-05.2017 гг., данные ГКЛ измеряются, в основном, только AMS-2. Зная, что характеристики ГКЛ существенно зависят от полярности ГМП, видимо, имеет смысл найти связи между результатами РБМ и прямыми измерениями ГКЛ отдельно для этих трёх периодов.

Наконец, понятно, что результаты эксперимента РБМ содержат значительно большую информацию, чем только максимальную интенсивность счёта детекторов $N_{1,2m}$ для обоих детекторов РБМ (одиночный счётчик и вертикальный телескоп). Однако экспериментально связь между детальными результатами РБМ и характеристиками первичных ГКЛ установить трудно. Поэтому наши надежды на уточнение и детализацию

данных о первичных ГКЛ из данных РБМ связаны с моделированием распространения КЛ в атмосфере, например, с помощью пакета [7].

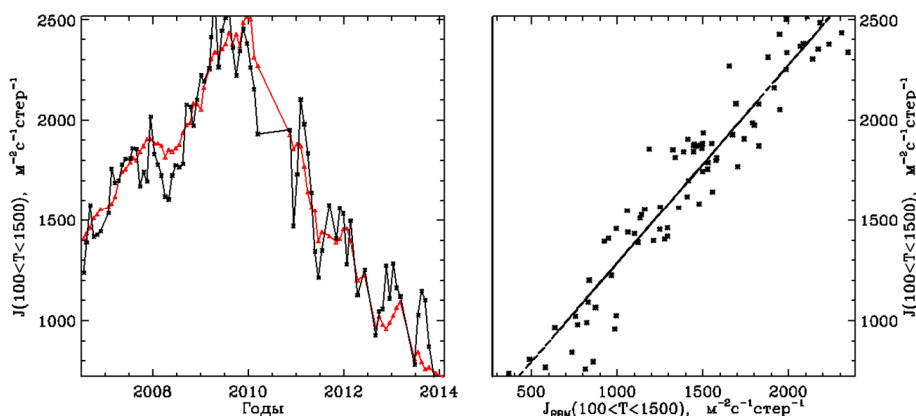


Рисунок 4. То же, что на рис. 2, но для интегральной интенсивности протонов ГКЛ $J(100 < T < 1500)$.

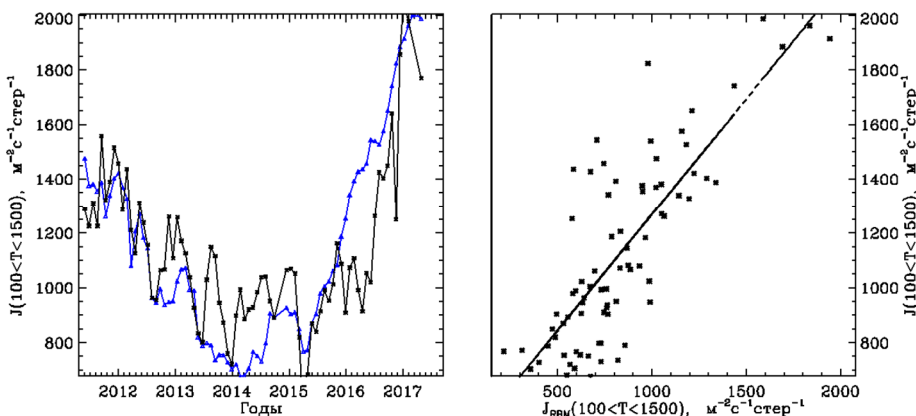


Рисунок 5. То же, что на рис. 3, но для интегральной интенсивности протонов ГКЛ $J(100 < T < 1500)$.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 17-02-00584_a, 18-02-00582_a, 19-52-60003_ЮАР-Г).

Литература

1. Bazilevskaya G.A., Svirzhevskaya A.K. On the stratospheric measurements of cosmic rays, *Space Science Reviews*, 85(3-4), 431-521, 1998.
2. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al., Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere, *Adv. Space Res.*, 44(10), 1124-1137, 2009.
3. Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А. и др., Поток космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957-2007), Препринт ФИАН № 14. М.: ФИАН, 77 с., 2007.
4. Adriani O. et al., Time dependence of the proton flux measured by PAMELA during the 2006 July–2009 December solar minimum, *ApJ*, 765, 91, 2013.
5. Martucci M. et al., Proton Fluxes Measured by the PAMELA Experiment from the Minimum to the Maximum Solar Activity for Solar Cycle 24, *ApJL*, 854: L2, 2018.
6. Aguilar M. et al., Observation of Fine Time Structures in the Cosmic Proton and Helium Fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station, *Phys/Rev.Lett.*, 121, 051101, 2018.
7. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Модельный комплекс для исследования космических лучей RUSCOSMIC, *Солнечно-земная физика*, 2(4), 3–10, 2016.