

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.

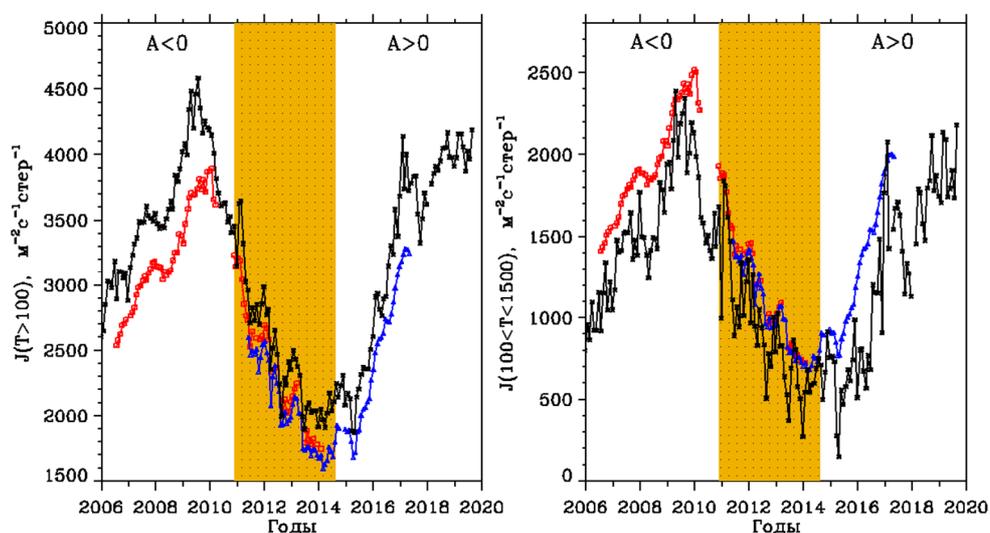


Рисунок 1. Интегральные интенсивности протонов ГКЛ $J(100 < T)$ (левая панель) и $J(100 < T < 1500)$ (правая панель, где T – энергия в МэВ, оценённые по данным эксперимента РБМ (черные кривые, звёздочки)) и по результатам измерений протонов ГКЛ в экспериментах PAMELA (красные кривые, квадраты) и AMS-2 (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.

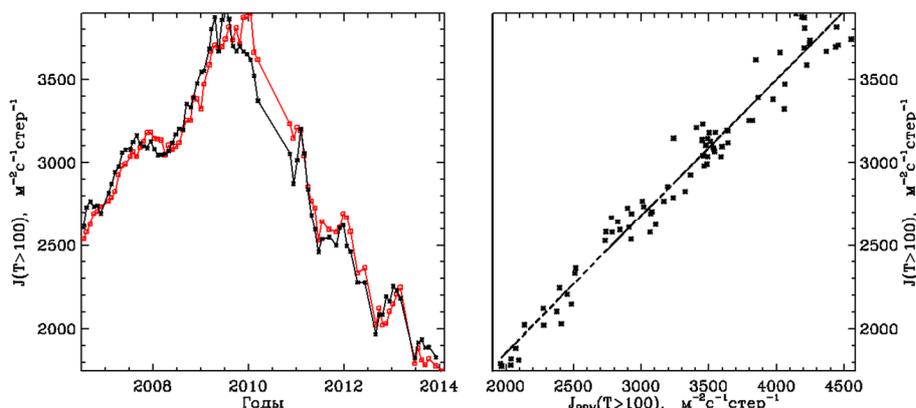


Рисунок 2. Левая панель – временной ход интегральной интенсивности $J(100<T)$ в 2006-2013 гг., определённой по данным PAMELA (J^{PAM} , красная кривая, квадраты), и по данным эксперимента РБМ, приведённым к J^{PAM} по линейной регрессии $J^{PAM} = A+B \cdot J^{RBM}$. Правая панель – корреляция между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

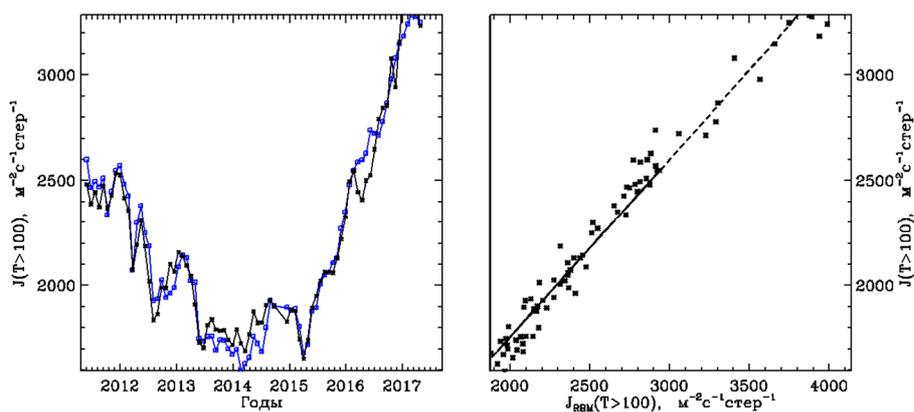


Рисунок 3. То же, что на рис. 2, но по данным РБМ и AMS-2 (синяя линия, квадраты) в 2011-2017 гг.

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].

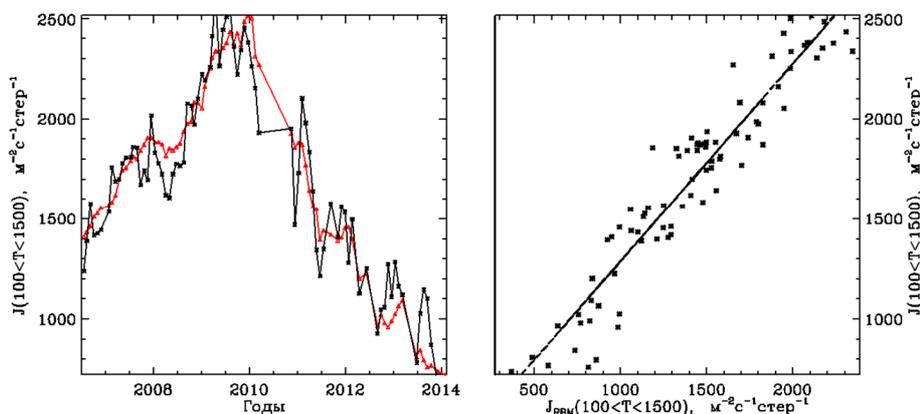


Рисунок 4. То же, что на рис. 2, но для интегральной интенсивности протонов ГКЛ $J(100 < T < 1500)$.

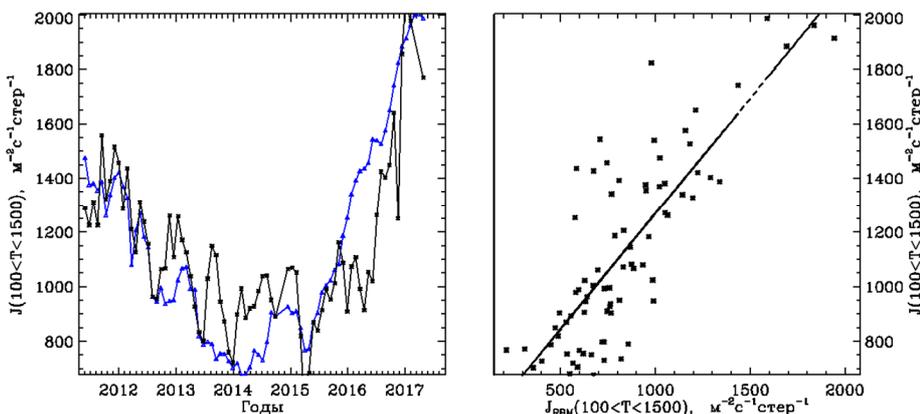


Рисунок 5. То же, что на рис. 3, но для интегральной интенсивности протонов ГКЛ $J(100 < T < 1500)$.

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., Потоки 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.