

АППРОКСИМАЦИЯ ПРИЕМНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ДЛЯ ШИРОТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

APPROXIMATION OF RECEPTION COEFFICIENTS OF COSMIC RAY NEUTRON COMPONENTS FOR LATITUDE MEASUREMENTS

П.Г. Кобелев 

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, kosmos061986@yandex.ru

В.Г. Янке 

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, yanke@izmiran.ru

P.G. Kobelev

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, kosmos061986@yandex.ru

V.G. Yanke

Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere,
and Radio Wave Propagation RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, yanke@izmiran.ru

Аннотация. При решении научных и прикладных задач, например при проведении широтного мониторинга, важно из данных наблюдений корректно исключить первичные вариации космических лучей. В любой точке мира первичные вариации с часовым разрешением определяются глобальной спектрографическим методом по данным мировой сети нейтронных мониторов. Поэтому целью работы была разработка и реализация методики коррекции данных мониторинга, главным моментом которой было получение приемных коэффициентов как функции широты. В результате получена аппроксимация жесткостной зависимости коэффициентов нулевой и первой гармоник анизотропии космических лучей, рассчитанных для наземной сети детекторов космических лучей. Анализ полученных результатов показал, что аппроксимация выполнена с достаточной точностью, результаты пригодны для использования при проведении широтных измерений во время морских экспедиций, а также полезны для оценки приемных коэффициентов новых станций мировой сети, оснащенных нейтронными детекторами. В перспективе такая работа будет проведена для станций мировой сети, оснащенных мюонными детекторами.

Ключевые слова: космические лучи, первичные вариации, вторичная нейтронная компонента, нейтронный монитор, анизотропия космических лучей, приемные коэффициенты.

Abstract. When solving scientific and applied problems such as latitude monitoring, it is important to correctly exclude primary cosmic-ray variations from observational data. At any point in the world, primary variations with an hourly resolution are determined globally by the spectrographic method based on data from the worldwide network of neutron monitors. Therefore, the aim of this study was to develop and implement a monitoring data correction method primarily intended to obtain reception coefficients as a function of latitude. As a result, this provided an approximation of the rigidity dependence of the zeroth and first harmonic anisotropy coefficients of cosmic rays calculated for a ground-based network of cosmic-ray detectors. Analysis of the obtained results showed that the approximation was performed with sufficient accuracy. The results can be used for latitude measurements during marine expeditions and for estimating reception coefficients of new stations in the worldwide network equipped with neutron detectors. In the future, such work will be carried out for stations in the worldwide network equipped with muon detectors.

Keywords: cosmic rays, primary variations, secondary neutron component, neutron monitor, cosmic ray anisotropy, reception coefficients.

ВВЕДЕНИЕ

Галактические космические лучи (КЛ) достигают Земли практически изотропно. Тем не менее, небольшая (несколько процентов) анизотропия в угловом распределении интенсивности КЛ, обусловленная динамическими процессами в солнечном ветре, существует постоянно и на порядки превосходит звездную анизотропию. Основная часть такой анизот-

ропии обусловлена вращением Земли вокруг своей оси. Это солнечно-суточная анизотропия первой гармоники, которая проявляется в наблюдательных данных как суточная волна в интенсивности КЛ. Эта компонента может быть представлена в виде вектора и называется векторной анизотропией, отражающей ток КЛ. Ток определяется двумя векторными слагаемыми конвективного и диффузионного происхождения. Конвективный ток возникает вследствие вы-

носа КЛ магнитным полем солнечного ветра и направлен от Солнца. Диффузионный ток обусловлен градиентом КЛ и их рассеянием на магнитных неоднородностях и направлен к Солнцу вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля. Но часто, особенно в период сильной модуляции, наблюдается также более сложное угловое распределение КЛ.

Почти за вековой период исследований анизотропии КЛ было опубликовано большое число работ (перечень можно найти в работе [Белов и др., 2023]). Постоянное внимание к этой теме связано с тем, что анизотропия чутко реагирует на все основные проявления СА и соответственно она чувствительна ко всем модуляционным процессам в гелиосфере.

Для выделения анизотропии КЛ разработаны локальные и глобальные методы анализа [Белов и др., 2023]. Популярности исследований анизотропии КЛ локальными методами способствовала легкость ее выделения из данных измерений. Но локальные методы выделения анизотропии (например, метод наложения эпох или метод гармонического анализа) требуют стационарных рядов данных и имеют ряд недостатков: более низкую статистическую точность и применение в сравнительно спокойные периоды СА. Кроме того, локальные методы требуют отдельной процедуры перехода к вариациям в гелиосфере за пределами атмосферы и магнитосферы Земли.

Глобальный метод (GSM — Global Survey Method) изучения вариаций первичных КЛ объединяет одно-временные наземные наблюдения КЛ на всех детекторах сети, и, по выражению Г.Ф. Крымского, представляет собой усложненный вариант сферического анализа, учитывающий атмосферу и магнитосферу Земли. Метод позволяет определять плотность (изотропную часть интенсивности) и анизотропию КЛ за каждый час за пределами магнитосферы и атмосферы и делает возможным исследование быстрых изменений анизотропии, связанных с динамикой межпланетной среды. Он, по существу, объединяет три метода: метод коэффициентов связи [Дорман, 1957], учитывающий атмосферу; метод траекторных расчетов движения частиц в геомагнитном поле [McCracken et al., 1962; Дорман и др., 1971], учитывающий магнитосферу Земли; метод сферического анализа [Крымский и др., 1966a; Корн, Корн, 1974], позволяющий выделить сферические гармоники для дальнейшего анализа.

Одна из самых первых и успешных реализаций глобального метода была разработана в Якутске [Крымский и др., 1966a, 6, 1967, 1981]. Практически в это же время свою методику предложили и японские исследователи [Nagashima, 1971]. Позже были созданы различные модификации этого метода, например в работах [Belov et al., 1973, 1974, 2018].

Группа иркутских исследователей разработала свою версию глобально-спектрографического метода [Dvornikov, Sdobnov, 1998], которая стала самой сложной и многоцелевой из существующих. Она используется для вычисления первой и второй гармоник анизотропии КЛ для определения вариаций планетарного распределения жесткостей геомагнитного обрезания и для оценки спектра вариаций.

При решении прикладных задач часто необходимо из данных наблюдений детектора исключить ожидае-

мые в данном пункте вариации КЛ, что является актуальной задачей. В изотропном приближении это можно выполнить по данным опорной станции [Кобелев и др., 2022]. В приближении первой гармоники оценить ожидаемые вариации можно на основе результатов GSM. В ИЗМИРАН реализован GSM для периода с 1957 г. по настоящее время, результаты такого анализа можно найти на ресурсе Yandex Disk ([<https://disk.yandex.ru/d/mKHMM2dzitqNoHw>] раздел GSM) или на сайте [<https://crst.izmiran.ru/w/feid>]. Следовательно, по результатам GSM оценки вариаций в приближении первой гармоники необходимо решить прямую задачу (нахождение ожидаемых вариаций в заданном пункте и в заданный момент времени). Но для решения такой задачи необходимо знать приемные коэффициенты, которые рассчитаны в [Yasue et al., 1982] только в дискретных точках для сети детекторов. Поэтому необходимо провести трудоемкие расчеты в произвольных точках по маршруту движения судна либо выполнить аппроксимацию приемных коэффициентов.

Аппроксимация приемных коэффициентов первой гармоники, которая производится впервые, является задачей настоящей работы. Она позволит оценить приемные коэффициенты для вновь организованных станций нейтронных мониторов, поскольку со времени публикации работы [Yasue et al., 1982] было создано около двадцати новых нейтронных детекторов. Кроме того, это позволит провести обработку данных широтных измерений во время проведения морских экспедиций.

Первая морская экспедиция была проведена в 1956 г. на ледоколе «Лабрадор» [Rose et al., 1956], задачей которой было проведение широтных исследований интенсивности КЛ в Северном полушарии до широт 30° N с помощью нейтронного монитора IGY и кубического мюонного телескопа. Для этой экспедиции строилась только кривая скорость счета — магнитная широта. С разработкой нейтронного монитора NM64 серия исследований была выполнена с помощью стандартного нейтронного монитора 3NM64 [Carmichael et al., 1965, 1969a, b, c, d] и по маршруту следования экспедиции уже были вычислены жесткости геомагнитного обрезания.

В последующие годы широтные измерения проводились многими исследовательскими группами: итальянскими, японскими, российскими, испанскими, немецкими, австралийскими, южноафриканскими. Особо следует отметить серию широтных измерений, проводимых ежегодно с 1994 по 2007 г., а также в 2018 и 2019 г. Бартольским институтом на борту ледокола «Полярная звезда». Повторяя такие широтные исследования с идентичным оборудованием, были получены функции связи и их временные изменения. В целом, это было выполнено в периоды солнечных минимумов 1954, 1965, 1976, 1987, 1996, 2009 и 2020 г. несколькими исследовательскими группами для нейтронной компоненты [Moraal et al., 1989; Nuntiyakul et al., 2014; Roopakun et al., 2023].

Анализ полученных функций связи показал, что спектр ГКЛ демонстрирует незначительные вариации в течение 22-летнего солнечного магнитного цикла

в дополнение к более сильным вариациям в течение 11-летнего цикла солнечной активности (СА). При $R_c \approx 7$ ГВ наблюдаются пересечения дифференциальных откликов для последовательных солнечных циклов. Это необходимое и достаточное условие объяснения того, почему интенсивность частиц при низких энергиях, измеренная на аэростатах и космических аппаратах, в 1976, 1996 г. была выше, чем в 1965, 1987 и 2009 г., а скорость счета нейтронных мониторов в 1976, 1996 г. была ниже, чем в 1965, 1987 и 2009 г.

При обработке широтных измерений необходимо решать несколько задач. Первая — вычисление жесткости геомагнитного обрезания с учетом внутреннего и внешнего магнитных полей по маршруту проведения широтных измерений. Эта задача решена в конце 60-х гг. [Carmichael et al., 1969a, b, c, d]. Вторая — построение математической модели при формировании и аппроксимации широтной зависимости скорости счета — жесткости геомагнитного обрезания. Эта задача решена в 70-х гг. с введением аппроксимирующей функции Границкого — Дормана [Dorman et al., 1970]. Следующей задачей является исключение атмосферных эффектов (барометрического эффекта, эффекта влажности, ветра, качки судна...) [Iucci et al., 2000] и, наконец, освобождение данных широтных измерений от первичных вариаций КЛ. Традиционно периоды значительных вариаций субъективно исключались при формировании широтной кривой. Разработка методики учета первичных вариаций КЛ в приближении нулевой и первой гармоник при проведении широтных измерений является задачей настоящей работы.

За семь десятилетий выполнено около 50 наземных и морских экспедиций с целью проведения широтных измерений нейтронной компоненты и только в нескольких проводились измерения мюонной компоненты [Rose et al., 1956; Blanco et al., 2019; Suttikulbut et al., 2025]. Важно, что эти данные не корректировались на температурный эффект, который по величине сравним с барометрическим эффектом. Кроме того, при формировании широтной кривой и функции связи только ~10 % кривой базируется на результатах мониторинга, остальная часть формируется аппроксимирующей функцией (для нейтронной компоненты это ~45 %). Поэтому получить экспериментальные функции связи мюонной компоненты пока не удалось.

Целью данной работы является разработка и реализация методики коррекции данных широтных измерений на первичные вариации КЛ. Главной задачей при этом является аппроксимация приемных коэффициентов нулевой и первой гармоник как функции жесткости геомагнитного обрезания

1. МЕТОД ГЛОБАЛЬНОЙ СЪЕМКИ: ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА

Кратко изложим принцип GSM и введем необходимые обозначения. Пусть известно решение обратной задачи, а именно амплитуда a нулевой гармоники и вектор первой сферической $\xi = (\xi_x, \xi_y, \xi_z)$.

Характеристики определены в геоцентрической солнечно-эклиптической системе GSE.

Приведем алгоритм решения прямой задачи, т. е. определения вариаций в заданных точках. Координаты наземных детекторов также определены в географической системе координат GEO, ось X' которой проходит через нулевой Гринвичский меридиан в плоскости земного экватора. Ось Z' параллельна оси вращения Земли. Для определения вектора первой сферической гармоники $\xi' = (\xi'_x, \xi'_y, \xi'_z)$ в земной системе координат, связанной с нулевым меридианом, необходимо для каждого i -го детектора ($i=1..m$) выполнить поворот вокруг оси Z' на угол $\varphi'_i = 2\pi / 24 \left(t + \frac{1}{2} \right)$, что соответствует t , часам

$$\xi' = M_Z^i (\xi^{\text{GEO}})^T, \quad (1)$$

$$M_Z^i = \begin{pmatrix} \cos \varphi'_i & \sin \varphi'_i & 0 \\ \sin \varphi'_i & \cos \varphi'_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Тогда ожидаемые на Земле вариации интенсивности космических лучей для каждого пункта наблюдения, в принятых в [Yasue et al., 1982] обозначениях, можно записать как

$$v^i = a C_{00}^i + C_x^i \xi_x + C_y^i \xi_y + C_z^i \xi_z, \quad (3)$$

где C_{00}^i и $C^i = (C_x^i, C_y^i, C_z^i)$ — приемные коэффициенты, связывающие вариации за пределами магнитосферы с вариациями, наблюдаемые на Земле. Эти коэффициенты зависят от координат и высоты наблюдения для каждого детектора, расположенного в данном пункте. Рассчитанные в [Yasue et al., 1982] приемные коэффициенты приведены в полярной системе координат, и для перехода в декартовую систему координат необходимо провести следующие преобразования для каждой станции с учетом ее долготы φ_s и угла сноса φ_{11} частиц в магнитном поле Земли:

$$\begin{aligned} C_x^i &= A_{11}^i \cos(\varphi_s^i + \varphi_{11}^i), \\ C_y^i &= A_{11}^i \sin(\varphi_s^i + \varphi_{11}^i), \\ C_z^i &= -C_{10}^i, \end{aligned} \quad (4)$$

где A_{11}^i — амплитуда экваториальной составляющей анизотропии первой сферической гармоники; φ_{11}^i — эффективный угол сноса частиц в магнитосфере Земли по данным [Yasue et al., 1982]. Он определяется по углам сноса по всему набору жесткостей как

$$\varphi_{11}^i = \int_{R_c^i}^{R_0} W^i(R_c^i, h_0, R) \varphi(R) dR,$$

где весовая функция W — функция связи. В работе вычислены также приемные коэффициенты северо-южной асимметрии и приемный коэффициент нуле-

вой гармоники $C_{00}^i = \int_{R_c^i}^{R_U} W^i(R) R^{-\gamma} dR$. Выбор знака в (4) и системы координат соответственно определяется характеристикой, с которой предполагается работать — вектором анизотропии или потоком космических лучей.

Для прямой задачи в матричной форме выражение (3) в случае первых гармоник можно записать как

$$v^i = aC_{00}^i + C^i M_z^i (\xi^{\text{GEO}})^T, \quad (5)$$

или, разворачивая (5) с учетом (2) и (4), для прямой задачи получим

$$v^i(t) = aC_{00}^i + C_x^i (\xi_x^{\text{GEO}} \cos \varphi_t^i + \xi_y^{\text{GEO}} \sin \varphi_t^i) + C_y^i (-\xi_x^{\text{GEO}} \sin \varphi_t^i + \xi_y^{\text{GEO}} \cos \varphi_t^i) + \xi_z^{\text{GEO}} C_z^i, \quad (6)$$

т. е. по известной амплитуде нулевой гармоники a и вектора первой сферической гармоники $\xi^{\text{GEO}} = (\xi_x^{\text{GEO}}, \xi_y^{\text{GEO}}, \xi_z^{\text{GEO}})$ оцениваются вариации КЛ

в i -м пункте с долготой φ_S^i в момент времени t , определяемый как $\varphi_t^i = \varphi_S^i + \varphi_{11}^i$.

Для обратной задачи нужно преобразовать систему уравнений (6) как

$$v^i(t) = aC_{00}^i + \xi_x^{\text{GEO}} (C_x^i \cos \varphi_t^i - C_y^i \sin \varphi_t^i) + \xi_y^{\text{GEO}} (C_y^i \cos \varphi_t^i + C_x^i \sin \varphi_t^i) + \xi_z^{\text{GEO}} C_z^i, \quad (7)$$

и в итоге получаем линейную систему m уравнений относительно неизвестных a и ξ^{GEO} в геоцентрической солнечно-эклиптической системе координат GEO.

Результаты такого анализа (7) для часового разрешения для периода с 1957 г. по настоящее время можно найти на ресурсе Yandex Disk [<https://disk.yandex.ru/d/mKHHMM2dztqNoHw>] (раздел GSM) или [<https://crst.izmiran.ru/w/feid>].

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Приемные коэффициенты для дискретно расположенных нейтронных мониторов мировой сети были рассчитаны в работе [Yasue et al., 1982], а для мюонных телескопов — в работе [Fujimoto et al., 1984]. Эти данные доступны на ресурсе Yandex Disk [<https://disk.yandex.ru/d/mKHHMM2dztqNoHw>] (раздел GSM). Приемные коэффициенты нулевой, первой и второй гармоник были рассчитаны для нескольких значений показателей γ степенного спектра вариаций и нескольких значений верхней жесткости R_U модуляции КЛ в гелиосфере.

Нужно отметить, что приемные коэффициенты рассчитаны для магнитосферы периода 1975 г. За последние 50 лет произошла перестройка магнитосферы [Гвоздевский и др., 2016], что должно привести к изменению асимптотических направлений и жесткостей геомагнитного обрезания. Существуют две аномальные зоны: Южно-Атлантическая с ускоренным уменьшением R_c до -2 ГВ и Северо-Атлантическая с увеличивающимся до $+2$ ГВ R_c . За период наблюдения космических лучей среднепланетарная жесткость геомагнитного обрезания для вертикального прихода частиц уменьшилась на 0.2 ГВ.

3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ К ИЗОТРОПНЫМ И АНИЗОТРОПНЫМ ВАРИАЦИЯМ

Важной характеристикой нейтронного монитора является его чувствительность к различным типам вариаций. При формировании сети детекторов важно определить, какие из них наиболее чувствительны, т. е. какие из них максимально реагируют на различные типы вариаций и наиболее подходят для решения тех или иных задач.

Для количественной оценки чувствительности к изотропным вариациям определены приемные коэффициенты нулевой гармоники C_{00} через функцию связи космических лучей $W(R, h_0)$ и спектр первичных вариаций (в простейшем случае чисто степенной $R^{-\gamma}$) как

$$C_{00}(R_c) = \int_{R_c}^{R_U} W(R, h_0) (R/10 \text{ ГВ})^{-\gamma} dR, \quad (8)$$

где $R_U = 100$ ГВ — граничная жесткость области модуляции.

На рис. 1, а показаны приемные коэффициенты нулевой гармоники мировой сети нейтронных мониторов для нескольких показателей степенного спектра вариаций по данным [Yasue et al., 1982]. Для сравнения показаны также приемные коэффициенты мюонной компоненты двух вертикальных мюонных телескопов Nagoya и Yakutsk [Fujimoto et al., 1984]. Как и следовало ожидать, самыми чувствительными являются высокогорные полярные детекторы. Действительно, для таких детекторов при $\gamma = 0.5$ (характерное значение для форбуш-понижения [Belov et al., 2021]) приемный коэффициент $C_{00} \sim 1\%$, т. е. изотропная вариация 1 % за пределами магнитосферы приведет к соответствующим наблюдаемым вариациям на Земле. Приведены также приемные коэффициенты C_{00} для $\gamma = 1.5$ (характерное значение для долговременных вариаций для отрицательной полярности магнитного поля $A < 0$ Солнца в периоды минимума СА) и для $\gamma = 1$ (характерное значение для долговременных вариаций при $A > 0$ в периоды минимума СА и в периоды всех максимумов СА [Lockwood et al., 2002; Yanke et al., 2019]).

Для мягкого жесткостного спектра вариаций (например для $\gamma = 1.0, 1.5$) приемный коэффициент нулевой гармоники для некоторых горных детекторов может быть больше единицы. Оценка приемных коэффициентов дана для спектра вариаций, приведенного к жесткости 10 ГВ. Реально же, в зависимости от мягкого спектра вариаций и максимальной жесткости в области модуляции R_U такая эффективная жесткость частиц не достигается ни для одной горной станции.

Рисунок 1, б показывает, какую реакцию на северно-южную асимметрию КЛ имеют наземные детекторы при ее величине 1 % за пределами магнитосферы. Видно, что асимптотические направления НМ таковы, что только несколько детекторов в Северном и Южном полушариях наблюдают более 50 % детекторы при ее величине в 1 % за пределами асимметрии. Из этих станций две пары Thule — McMurdo

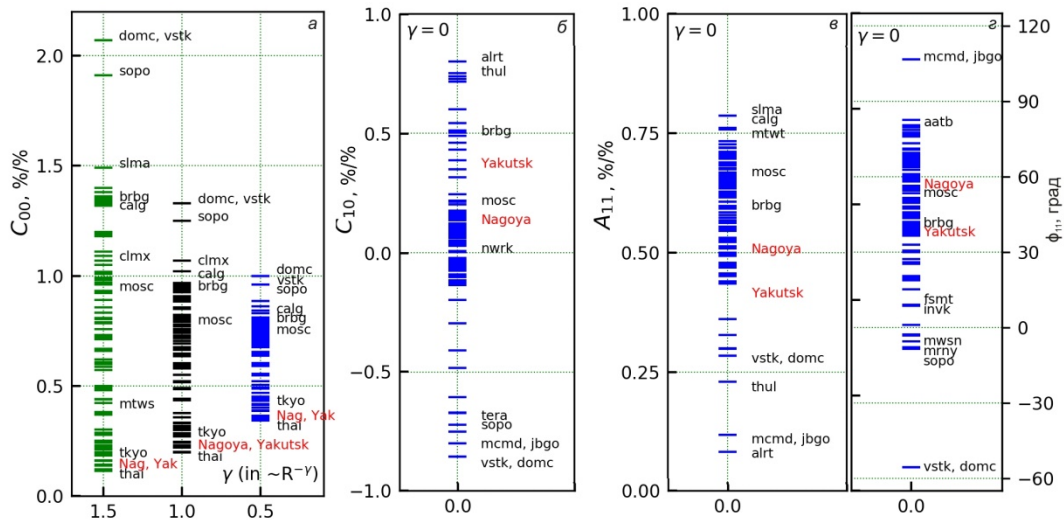


Рис. 1. Приемные коэффициенты нейтронной компоненты КЛ нулевой гармоники для показателей спектра $\gamma=1.5$, 1.0, 0.5 (а); приемные коэффициенты C_{10} северно-южной асимметрии КЛ (б); амплитуда A_{11} экваториальной составляющей анизотропии первой сферической гармоники и эффективный угол сноса частиц ϕ_{11} в магнитосфере Земли (в, г) по данным [Yasue et al., 1982]. Для сравнения показаны приемные коэффициенты мюонной компоненты двух вертикальных мюонных телескопов Nagoya и Yakutsk [Fujimoto et al., 1984]

и South Pole — Terre Adelie наблюдают 80 % асимметрии. Лучшей парой станций для изучения северо-южной асимметрии является Thule — McMurdo, поскольку величина их отклика на изотропные вариации практически одинакова (расположены вблизи уровня моря) и станции имеют самую слабую реакцию на суточные вариации (см. рис. 1, в, г).

Рисунок 1, в, г показывает, что экваториальная составляющая анизотропии первой сферической гармоники (звездно-суточная вариация) хорошо измеряется существующей сетью нейтронных мониторов, поскольку имеется ~30 нейтронных мониторов с приемными коэффициентами $A_{11} > 0.5$. Только полдесятка полярных детекторов имеют слабую реакцию на суточные вариации $A_{11} < 0.3$, что важно, как отмечалось выше, для выделения северо-южной асимметрии. Для оценки суточной вариации желательно равномерное распределение детекторов по асимптотической долготе, что не всегда наблюдается, особенно в регионах Атлантического и Тихого океанов.

4. МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Для решения поставленной задачи аппроксимации в первую очередь необходимо построить модели аппроксимации. При обработке широтных измерений космических лучей очень эффективной оказалась аппроксимирующая функция Границкого—Дормана $N = c[1 - \exp(-\alpha R^{-\kappa+1})]$, предложенная в работе [Dorman et al., 1970]. Можно ожидать, что такая же математическая модель оптимальна для аппроксимации приемных коэффициентов нулевой гармоники C_{00} .

Жесткостные зависимости приемных коэффициентов первой гармоники сложнее, и модели аппроксимации строились индивидуально также на основе функции Границкого—Дормана. Все аппроксимирующие функции, кроме одного нормирующего па-

раметра c , нелинейные. Выполнение нелинейной аппроксимации, а также комплексный анализ результатов аппроксимации проводился с помощью программного пакета, выполненного на Python (<https://lmfit.github.io/lmfit-py/model.html#lmfit.model.ModelResult>, модель `Model().fit()`).

Задача регрессионного анализа — построение математических моделей, оценки их параметров, связи и ошибок.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты аппроксимации показаны на рис. 2–5 и сведены в таблице.

На рис. 2 для уровня моря даны зависимости от жесткости геомагнитного обрезания приемных коэффициентов нулевой гармоники, рассчитанных в работе [Yasue et al., 1982], для минимума и максимума СА и аппроксимирующая кривая на основе функции Границкого — Дормана

$$C_{00} = c[1 - \exp(-\alpha R^{-\kappa+1})]$$

с оценкой трех параметров. Приемные коэффициенты C_{00} приведены для показателя степенного спектра нулевой гармоники $\gamma=0.5$ и значения граничной жесткости модуляции КЛ в гелиосфере $R_U = 100$ ГВ.

Показателем качества модели в регрессионном анализе является коэффициент детерминации R^2 , высокое значение которого свидетельствует об адекватной модели аппроксимации. В случае C_{00} , как это следует из таблицы, $R^2 \approx 0.97$, т. е. 97 % объясняется учтенными факторами и только 3 % — неучтенными. Необъясненную часть коэффициента детерминации $1-R^2$ можно обосновать несколькими причинами. Во-первых, отмечается разброс глубин при проведении аппроксимации данных, поскольку использовались горно-равнинные станции (глубина ~1000–900 гПа); высокогорные станции, показанные на рис. 2 треугольниками, были исключены при аппроксима-

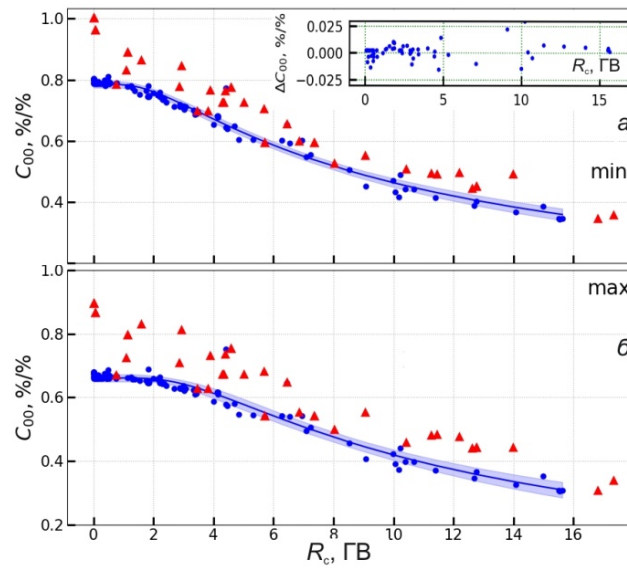


Рис. 2. Зависимость приемного коэффициента C_{00} нулевой гармоники для уровня моря от жесткости геомагнитного обрезания и доверительного интервала на уровне 3σ . Треугольниками отмечены горные станции. Приемные коэффициенты C_{00} рассчитаны для показателя степенного спектра нулевой гармоники $\gamma=0.5$ и минимума и максимума СА

Вид аппроксимирующих функций и результаты аппроксимации приемных коэффициентов первой гармоники КЛ для минимума и максимума СА

Аппроксимация		min SA	$R^2; \chi^2$	max SA	R^2
$C_{00} = c [1 - \exp(-\alpha R^\kappa)]$	с	0.785 ± 0.004	0.975	0.661 ± 0.004	0.948
	а	6.230 ± 0.360		11.15 ± 1.29	
	к	0.845 ± 0.026	0.001	1.045 ± 0.050	
Положительная ветвь $C_{10} = +c \exp(-\alpha R^\kappa)$	с	0.791 ± 0.052	0.828	0.722 ± 0.050	0.816
	а	1.021 ± 0.097		0.924 ± 0.103	
	к	0.603 ± 0.073	0.06	0.639 ± 0.084	
Отрицательная ветвь $C_{10} = -c \exp(-\alpha R^\kappa)$	с	0.713 ± 0.062	0.829	0.677 ± 0.025	0.965
	а	1.350 ± 0.235		1.075 ± 0.103	
	к	0.310 ± 0.090	0.03	0.583 ± 0.087	
$A_{11} = c R^\kappa \exp(-\alpha R^{1/3})$	с	1.649 ± 0.147	0.711	1.596 ± 0.154	0.701
	а	0.896 ± 0.080		0.949 ± 0.087	
	к	0.314 ± 0.030	0.003	0.343 ± 0.034	
$\varphi_{11} = c R^\kappa \exp(-\alpha R)$	с	40.29 ± 1.58	0.791	38.62 ± 1.52	0.803
	а	0.052 ± 0.010		0.051 ± 0.010	
	к	0.468 ± 0.051	90	0.471 ± 0.051	

ции. Во-вторых, вклад в необъясненную часть коэффициента детерминации дают ошибки вычислений самих коэффициентов, которые в работе [Yasue et al., 1982] не приводятся.

Приведен доверительный интервал на уровне 3σ , и для ~100 детекторов за пределами такого доверительного интервала может оказаться только одна точка. Реально же число точек больше, что связано с разбросом (1000–900 ГПа) глубин детекторов в атмосфере.

На вкладке показана также зависимость от жесткости невязки решения приемных коэффициентов C_{00} для минимума СА. Ошибка оценки на основе аппроксимирующего выражения приемных коэффициентов C_{00} составляет ~2 %.

Экспериментальные значения χ^2_v приведены в таблице. Видно, что для всех рассматриваемых зависимостей выполняется условие $\chi^2_v < \bar{\chi}^2_v(p)$. Действительно, в таблице критическое значение распределения $\bar{\chi}^2_v(p)$ для числа степеней свободы $\nu \sim 90$ (число станций) и уровня доверия $p=0.01$ (уровень значимости 0.99) равно $\bar{\chi}^2_v(p) = 137$ [<https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3674.htm>].

Особенное поведение приемных коэффициентов северно-южной асимметрии C_{10} проявляется в расщеплении кривых на северную и южную ветви, определяемые асимптотическими направлениями частиц.

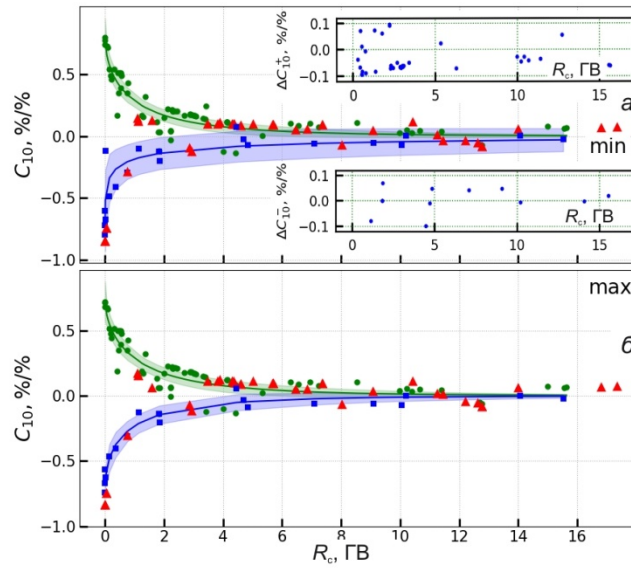


Рис. 3. Зависимость приемного коэффициента C_{10} северо-южной составляющей анизотропии первой сферической гармоники от жесткости геомагнитного обрезания и доверительного интервала на уровне 3σ . Треугольниками показаны горные станции. Приемные коэффициенты C_{10} рассчитаны для показателя степенного плоского спектра первой гармоники $\gamma=0.0$, $R_U=100$ ГВ для минимума и максимума СА

В качестве аппроксимирующих кривых также использовалась функция на основе Границкого — Дормана $C_{10} = c \exp(-\alpha R^k)$ для Северного и Южного полушарий с оценкой трех параметров аппроксимации. Результаты приведены в таблице. Исходными являлись приемные коэффициенты C_{10} для показателя степенного спектра нулевой гармоники $\gamma=0$. Графический результат представлен на рис. 3, на вкладке которого показаны также невязки проведенной аппроксимации приемных коэффициентов C_{10} для минимума СА. Коэффициент детерминации R^2 в случае C_{10} , как это следует из таблицы, составляет только ≈ 0.83 . Это связано с тем, что в анализе фактически участвуют только небольшое число высокоширотных станций, остальные детекторы нечувствительны к таким типам вариаций. Ошибка оценки на основе аппроксимирующего выражения приемных коэффициентов C_{10} составляет $\sim 8\%$.

Наиболее сложной задачей оказалось аппроксимация приемных коэффициентов амплитуды экваториальной составляющей анизотропии A_{11} . В качестве аппроксимирующей кривой использовалась функция на основе Границкого — Дормана $A_{11} = cR^k \exp(-\alpha R^{1/3})$ с оценкой трех параметров.

Множитель R^k в виде степенной функции хорошо отражает поведение функции для жесткостей в области плато широтного хода КЛ до ~ 3 ГВ; экспоненциальное затухание для жесткостей вплоть до экватора плохо отражает реальное поведение приемных коэффициентов. Об этом свидетельствует полученный достаточно низкий коэффициент детерминации $R^2=0.71$. Из рис. 4 видно, что экспоненциальное затухание заканчивается при ~ 10 ГВ, далее кривая стремится на плато. Результаты приведены в таблице. Исходными являлись приемные коэффициенты A_{11} для показателя степенного спектра нулевой гармоники $\gamma=0$. Ошибка оценки на основе аппрокси-

мирующего выражения приемных коэффициентов A_{11} составляет $\sim 10\%$.

Всегда ли низкие значения R^2 являются проблемой? Регрессионные модели с достаточно низкими значениями R^2 (например, 0.7 для приемного коэффициента A_{11}) могут быть вполне хорошими по следующей причине: найденные параметры представляют собой средние значения, но R^2 отражают изменчивость и в итоге это означает большой разброс независимых данных, а для контроля нужен анализ невязки математической модели. В итоге низкий коэффициент детерминации R^2 не умаляет значимости каких-либо значимых переменных. Как правило, нет дополнительных причин не принимать во внимание полученные результаты модели [Frost, 2025].

И, напротив, всегда ли высокие значения R^2 надежны? Тестовым испытанием служит невязка, которая должна быть случайной величиной с нормальным распределением. Если появились какие-нибудь тренды, это означает, что линейная модель недостаточно определена, линия регрессии постоянно недооценивает и переоценивает данные вдоль кривой, что является смещением. Такую модель необходимо дополнить независимыми переменными. Графики остатков помогают гарантировать корректность регрессионной модели [Frost, 2026].

Для зависимости эффективного угла сноса ϕ_{11} частиц в магнитосфере Земли от жесткости геомагнитного обрезания также можно использовать аппроксимирующее выражение на основе функции Границкого — Дормана $\phi_{11} = cR^k \exp(-\alpha R)$. Результаты приведены в таблице. Исходными являлись углы сноса ϕ_{11} частиц в магнитосфере Земли для показателя степенного спектра нулевой гармоники $\gamma=0$.

Результат представлен на рис. 5, на вкладке которого показаны также невязки углов сноса ϕ_{11} частиц для минимума СА. Коэффициент детерминации

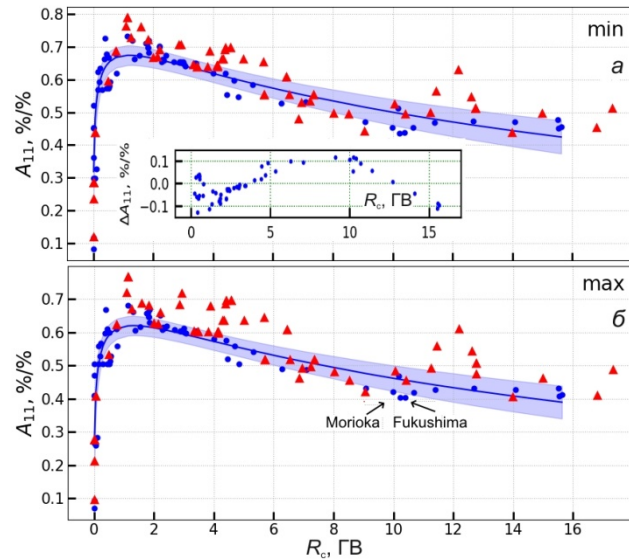


Рис. 4. Зависимость амплитуды A_{11} экваториальной составляющей анизотропии первой сферической гармоники от жесткости геомагнитного обрезания и доверительного интервала на уровне 3σ . Треугольниками показаны горные станции. Приемные коэффициенты A_{11} вычислены для показателя степенного спектра первой гармоники $\gamma=0.0$, $R_U=100$ ГВ для минимума и максимума СА

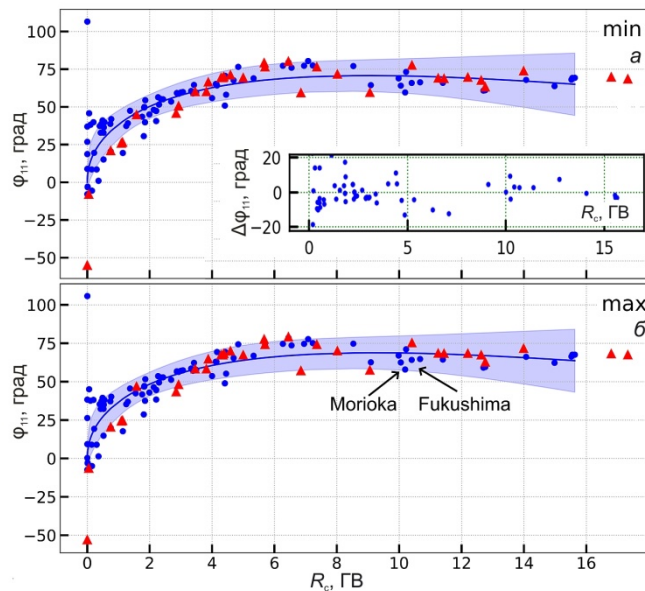


Рис. 5. Зависимость эффективного угла сноса ϕ_{11} частиц в магнитосфере Земли первой сферической гармоники от жесткости геомагнитного обрезания и доверительного интервала на уровне 3σ . Треугольниками показаны горные станции. Приемные коэффициенты A_{11} и эффективные углы ϕ_{11} сноса частиц в магнитосфере Земли вычислены для показателя степенного спектра первой гармоники $\gamma=0.0$, $R_U=100$ ГВ для минимума и максимума СА

R^2 в случае ϕ_{11} , как это следует из таблицы, составляет только ≈ 0.79 . Это связано с тем, что в анализе фактически участвуют только небольшое число высокоширотных станций, остальные детекторы нечувствительны к таким типам вариаций. Ошибка оценки на основе аппроксимирующего выражения угла сноса ϕ_{11} частиц для минимума СА $\sim 5\%$.

Ниже на сводном рис. 6 показаны оценки временной (жесткостной) зависимости приемных коэффициентов нулевой и первой гармоник КЛ для широтных измерений на примере 34-й экспедиции НИС «Академик Курчатов» (20.12.1981–21.04.1982, Владивосток—Калининград). Маршрут судна показан на вкладке рис. 6, а. Экспедиция проводилась в макси-

муме СА. В этот четырехмесячный период наблюдалось ~ 50 форбуш-понижений различной амплитуды — в этот активный период СА вариациям внеземного происхождения необходимо уделить особое внимание. Детали можно увидеть на [https://crst.izmiran.ru/w/feid].

На рис. 6, а показан временной ход вертикальной жесткости геомагнитного обрезания R_c [https://crst.izmiran.ru/cutoff] и временной ход приемных коэффициентов нулевой гармоники C_{00} по маршруту следования судна. Приемные коэффициенты определялись по результатам, сведенным в таблице. Кружками на рис. 6 показаны приемные коэффициенты станций, которые находились вблизи маршрута движения судна ($<2^\circ$ по широте и $<3^\circ$ по долготе).

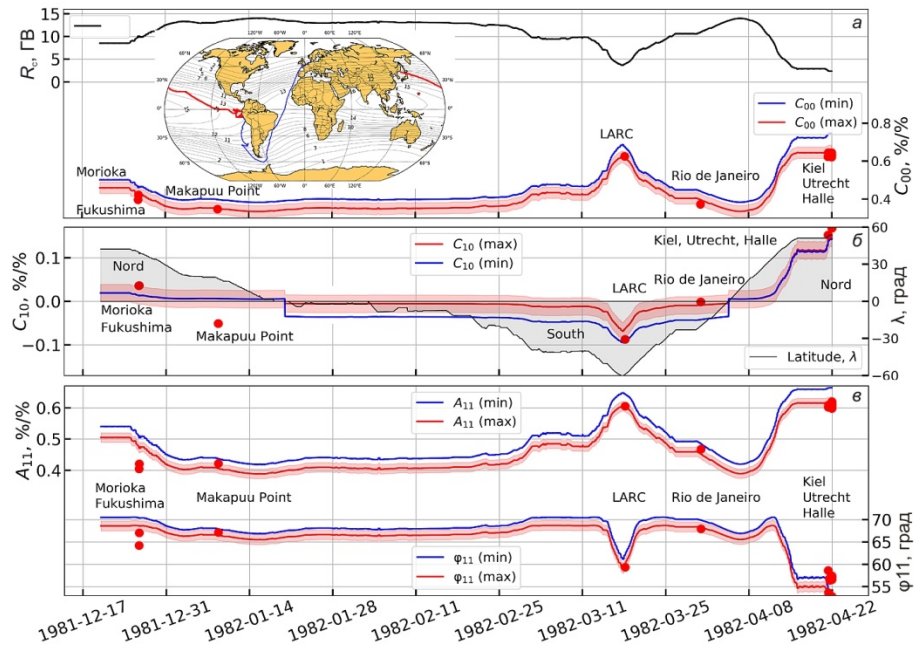


Рис. 6. Изменение вертикальной жесткости геомагнитного обрезания R_c и приемных коэффициентов нулевой и первой гармоники по маршруту следования НИС «Академик Курчатов» из Владивостока в Калининград. Кружками показаны приемные коэффициенты станций, которые находились вблизи ($<2^\circ$ по широте и $<3^\circ$ долготы) маршрута движения судна

Из-за уникальности маршрута, это всего несколько станций: Япония, о-в Гавайи, Антарктида (LARC), южная Америка и несколько европейских станций. Согласие отмечается в пределах коридора ошибок.

На рис. 6, б показан временной ход приемного коэффициента C_{10} северно-южной асимметрии КЛ. Он мал, поскольку маршрут судна лежал в средних и экваториальных широтах.

На рис. 6, в показан временной ход амплитуды A_{11} экваториальной составляющей анизотропии первой сферической гармоники и временной ход эффективного угла сноса частиц ϕ_{11} в магнитосфере Земли по маршруту следования судна. Расчетные значения амплитуды A_{11} и фазы ϕ_{11} находятся в пределах коридора ошибок, за исключением японских станций Morioka и Fukushima. Возможно, отклонение объясняется расчетной ошибкой, что для этих станций подтверждается рис. 4, 5.

Заметим, что функция Границкого—Дормана также хорошо описывает жесткостную зависимость барометрического коэффициента нейтронной компоненты, необходимую при обработке широтных измерений космических лучей. Экспериментально барометрический коэффициент определяется для сети станций космических лучей или непосредственно при проведении экспедиционных работ. Опыт показывает, что в рамках одной экспедиции не удастся получить надежный ряд значений барометрического коэффициента, поскольку в ключевых точках наблюдений часто или не обеспечивается достаточная статистика, или нет больших изменений атмосферного давления. Следовательно, экспериментальный ряд значений барометрического коэффициента формируется по данным многих экспедиций. Зависимость барометрического коэффициента от жесткости аппроксимировалась в виде

$$\beta(R_c) = \beta_0 \left[1 - \exp(-\alpha R_c^{-\kappa}) \right], \quad (9)$$

для которой найдены коэффициенты аппроксимации β_0 , α , $\kappa = (0.751 \text{ \%}/\text{ГПа}, 5.69, 0.411)$ для свинцового нейтронного монитора NM64 и β_0 , α , $\kappa = (0.766 \text{ \%}/\text{ГПа}, 5.69, 0.411)$ для детектора эпитепловых нейтронов NM64E. Раскладывая экспоненту в ряд для небольших значений показателя, получим $\beta(R_c) = \beta_0 \alpha R_c^{-\kappa}$, что подтверждается экспериментальной работой [Mendonca et al., 2019].

ОСНОВНЫЕ ВЫВОодЫ

Для всех нейтронных мониторов мировой сети проведена аппроксимация приемных коэффициентов нулевой и первой гармоники как функции жесткости геомагнитного обрезания. В основу взяты численные расчеты из работы [Yasue et al., 1982], проведенные для дискретных пунктов сети станций космических лучей.

Разработанные математические модели, базирующиеся на функции Границкого—Дормана [Dorman et al., 1970], оптимальны для аппроксимации приемных коэффициентов. Коэффициенты детерминации и критерий χ^2 свидетельствуют об адекватности применяемых моделей аппроксимации.

Результаты работы могут использоваться при обработке данных широтных измерений нейтронной компоненты космических лучей, а также быть полезны для оценки приемных коэффициентов новых станций мировой сети, оснащенных нейтронными детекторами. В перспективе такая работа будет проведена для станций мировой сети, оснащенных мюонными детекторами.

Авторы благодарны участникам NMDB проекта [www.nmdb.eu]. Работа проводится в рамках УНУ

«Российская национальная наземная сеть станций КЛ (Сеть СКЛ)» [<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536>] и проекта МинНауки «Морские научные исследования» 2025 и 2027 г.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета ИЗМИРАН темы 1021025032100209-7-1.3.8 «Солнечная активность и ее проявления в гелиосфере и околоземном космическом пространстве» (FFUM-2026-0005).

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов с другими исследователями в данной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Шлык Н.С., Абунина М.А. и др. Выделение солнечно-суточной анизотропии космических лучей локальным и глобальным методами. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2023, т. 63, № 3, с. 306–320. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600594>.
- Гвоздевский Б.Б., Белов А.В., Янке В.Г. и др. Магнитосферные эффекты космических лучей. I. Долгопериодные изменения жесткостей геомагнитного обрезания мировой сети нейтронных мониторов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016, т. 56, № 4, с. 411–422. <https://doi.org/10.7868/S0016794016040040>.
- Дорман Л.И. *Вариации космических лучей*. М.: Гостехиздат, 1957, 285 с.
- Дорман Л.И., Смирнов В.С., Тясто М.И. *Космические лучи в магнитном поле Земли*. М.: Наука, 1971, 309 с.
- Кобелев П.Г., Трефилова Л.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Метод коррекции данных нейтронных мониторов на эффект снега. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2022, т. 62, № 6, с. 737–742. <https://doi.org/10.31857/S0016794022060086>.
- Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы*. М.: Наука, 1974, 832 с.
- Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И., Скрипин Г.В. *Новый метод исследования анизотропии космических лучей. Иссл. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. М.: Наука, 1966а, 105 с.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. I. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1966б, т. 6, № 8, с. 991–996.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Чирков Н.П. и др. Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов. II. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1967, т. 7, № 1, с. 11–15.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А. и др. *Космические лучи и солнечный ветер*. Новосибирск: Наука, 1981, 224 с.
- Belov A.V., Blokh Ya.A., Dorman L.I., et al. Studies of isotropic and anisotropic cosmic ray variations in the Earth's vicinities during disturbed periods. *Proc. 13th ICRC*. Denver, 1973, vol. 2, pp. 1247–1255.
- Belov A.V., Blokh Ya.L., Dorman L.I., et al. Anisotropy and time-dependent changes in the spectrum of cosmic-ray intensity variations during August, 1972. *Izv. Ser. Fiz.* 1974, vol. 38, pp. 1867–1875.
- Belov A., Eroshenko E., Yanke V.G., et al. The Global Survey Method applied to ground-level cosmic ray measurements. *Solar Phys.* 2018, vol. 293, iss.4, article id. 68. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1277-6>.
- Belov A., Papaioannou A., Abunina M., et al. On the rigidity spectrum of cosmic-ray variations within propagating interplanetary disturbances: neutron monitor and SOHO/EPHIN observations at ~1–10 GV. *Astrophys. J.* 2021, vol. 908, iss. 4, id. 5, p. 14. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/abd724>.
- Blanco J.J., García-Población O., García-Tejedor I., et al. ORCA (Antarctic Cosmic Ray Observatory): 2018 latitudinal survey. *Proc 36th ICRC*. Madison, 2019, id 1059.
- Carmichael H., Bercovitch M., Steljes J.F., Magidin M. Latitude survey in North America, *Proc. 9th Int. Cosmic Ray Conf.* London, 1965, vol. 1, pp. 553–556.
- Carmichael H., Bercovitch M., Steljes J.F., Magidin M. I. Cosmic-ray latitude survey in North America in summer, 1965. *Canadian J. Phys.* 1969a, vol. 47, iss. 19, pp. 2037–2050. <https://doi.org/10.1139/p69-257>.
- Carmichael H., Bercovitch M. II. Cosmic-ray latitude survey in Canada in December, 1965. *Canadian J. Phys.* 1969b, vol. 47, iss. 19, pp. 2051–2055. <https://doi.org/10.1139/p69-258>.
- Carmichael H., Shea M.A., Peterson R.W. III. Cosmic-ray latitude survey in Western USA and Hawaii in summer, 1966. *Canadian J. Phys.* 1969c, vol. 47, iss. 19, pp. 2057–2065. <https://doi.org/10.1139/p69-259>.
- Carmichael H., Shea M.A., Smart D.F., John R. McCall. IV. Geographically smoothed geomagnetic cutoffs. *Canadian J. Phys.* 1969d, vol. 47, iss. 19, pp. 2067–2072. <https://doi.org/10.1139/p69-260>.
- Dorman L.I., Fedchenko S.G., Granitsky L.V., Riche G.A. Coupling and barometer coefficients for measurements of cosmic ray variations at altitudes of 260–400 mb. *Acta Physica Academia Scientiarum Hungarica*. 1970, vol. 29, Suppl. 2, pp. 233–236. <https://adsabs.harvard.edu/full/1970ICRC....2..233D>.
- Dvornikov V.M., Sdobnov V.E. Analyzing the solar proton event of 22 October 1989, using the method of Spectrographic Global Survey. *Solar Phys.* 1998, vol. 178, pp. 405–422. <https://doi.org/10.1023/A:1005069806374>.
- Frost J. How to interpret regression models with significant variables but low R^2 [Electronic resource]. URL: <https://statisticsbyjim.com/regression/low-r-squared-regression> (accessed December 22, 2025).
- Frost J. Five reasons why your coefficient of determination may be too high [Electronic resource]. URL: <https://statisticsbyjim.com/regression/r-squared-too-high> (accessed January 11, 2026).
- Fujimoto K., Inoue A., Murakami K., Nagashima K. Coupling coefficients of cosmic ray daily variations for meson telescopes. *Rep. of Cosmic Ray Res. Laboratory*. 1984, iss.9, 185 p.
- Iucci N., Villoresi G., Dorman L.I., Parisi M. Cosmic ray survey to Antarctica and coupling functions for neutron component near solar minimum (1996–1997) II. Determination of meteorological effects. *J. Geophys. Res.* 2000, vol. 105, iss. A9, pp. 21035–21045. <https://doi.org/10.1029/2000JA900050>.
- Lockwood J.A., Debrunner H. Rigidity dependence of the 11-year variation of the cosmic ray intensity from 0.6 to 50 GV at the Earth in two 22-year cycles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2002, vol. 107, iss. A8, pp. SSH 5-1–SSH 5-11. <https://doi.org/10.1029/2001JA000186>.
- McCracken K.G., Rao U.R., Shea M.A. The trajectories of cosmic rays in a high degree simulation of the geomagnetic field. *MIT Techn. Rep.* 1962, iss.77, 146 p.
- Mendonca R.R.S., Wang C., Braga C.R., et al. Analysis of cosmic rays atmospheric effects and their relationships to cutoff rigidity and zenith angle using global muon detector network data. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019, vol. 124, iss. 12, pp. 9791–9813. <https://doi.org/10.1029/2019JA026651>.
- Moraal H., Potgieter M.S., Stoker P.H., Van der Wait A.J. Neutron monitor latitude survey of cosmic ray intensity during the 1986–1987 solar minimum. *J. Geophys. Res.* 1989, vol.94, iss. A2, pp. 1459–1464. <https://doi.org/10.1029/JA094iA02p01459>.

- Nagashima K., Three-dimensional cosmic ray anisotropy in interplanetary space. *Rep. Ionosphere Space Res.* 1971, vol. 25, pp. 189–211.
- Nuntiyakul W., Evenson P., Ruffolo D., et al. Latitude survey investigation of galactic cosmic ray solar modulation during 1994–2007. *Astrophys. J.* 2014, vol. 795, iss. 1, id. 11. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/11>.
- Poopakun K., Nuntiyakul W., Khamphakdee S., et al. Solar magnetic polarity effect on neutron monitor count rates: comparing latitude surveys and Antarctic stations. *Astrophys. J.* 2023, vol. 958, iss.1, id. 80. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad02f1>.
- Rose D.C., Fenton K.B., Katzman J., Simpson J.A. Latitude effect of the cosmic ray nucleon and meson components at sea level from the Arctic to the Antarctic. *Canadian J. Phys.* 1956, vol. 34, iss. 9, pp. 968–984. <https://doi.org/10.1139/p56-107>.
- Suttikulbutr A., Krajangvittaya P., Phothaworn P., et al. Latitude dependent cosmic ray measurements using a cosmic watch detector. *Proc. 39 ICRC*. Geneva, 2025, id. 1254. <https://doi.org/10.22323/1.501.1254>.
- Yanke V.G., Belov A.V., Gushchina R.T., Zirakashvili V.N. The rigidity spectrum of the long-term cosmic ray variations during solar activity cycles 19–24. *Phys.: Conf. Ser.* 2019, 1181 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012007>.
- Yasue S., Mori S., Sakakibara S., Nagashima K. Coupling coefficients of cosmic ray daily variations for neutron monitor stations. *Rep. of Cosmic Ray Res. Laboratory.* 1982, iss.7, 225 p.
- URL: <https://disk.yandex.ru/d/mKHMM2dztqNoHw> (датаобращения 13 июля 2026 г.).
- URL: <https://crst.izmiran.ru/w/feid> (датаобращения 13 июля 2026 г.).
- URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda3674.htm> (датаобращения 13 июля 2026 г.).
- URL: <https://lmfit.github.io/lmfit-py/model.html#lmfit.model.ModelResult> (датаобращения 13 июля 2026 г.).
- URL: <https://crst.izmiran.ru/w/feids> (датаобращения 13 июля 2026 г.).
- URL: <https://crst.izmiran.ru/cutoff> (датаобращения 13 июля 2026 г.).
- URL: www.nmdb.eu (датаобращения 13 июля 2026 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536> (датаобращения 13 июля 2026 г.).

Как цитировать эту статью:

Кобелев П.Г., Янке В.Г. Аппроксимация приемных коэффициентов нейтронной компоненты космических лучей для широтных измерений. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 3, с. 71–81. <https://doi.org/10.12737/szf-123202607>.