

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ
ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ ГЕЛИОСФЕРЫ
И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА МОДУЛЯЦИЮ
ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

**INVESTIGATING THE INFLUENCE OF GEOMETRY OF THE HELIOSPHERIC
NEUTRAL CURRENT SHEET AND SOLAR ACTIVITY ON MODULATION
OF GALACTIC COSMIC RAYS WITH A METHOD OF MAIN COMPONENTS**

П.Ю. Гололобов

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, gpeter@ikfia.ysn.ru*

П.А. Кривошапкин

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, p_a_krivoshapkin@mail.ru*

Г.Ф. Крымский

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, krymsky@ikfia.ysn.ru*

С.К. Герасимова

*Институт космофизических исследований и аэронауки
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Якутск, Россия, s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru*

P.Yu. Gololobov

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, gpeter@ikfia.ysn.ru*

P.A. Krivoshapkin

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, p_a_krivoshapkin@mail.ru*

G.F. Krymsky

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, krymsky@ikfia.ysn.ru*

S.K. Gerasimova

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research
and Aeronomy SB RAS,
Yakutsk, Russia, s_k_gerasimova@ikfia.ysn.ru*

Аннотация. Исследуется совокупное модулирующее воздействие геометрии нейтральной поверхности межпланетного магнитного поля и солнечной активности на распространение галактических космических лучей в гелиосфере. При помощи метода главных компонент произведена оценка роли каждого фактора в модуляции космических лучей. Применение метода к экспериментальным данным по уровню солнечной активности, углу раствора нейтральной поверхности и интенсивности космических лучей за длительный период времени с 1980 по 2018 г. позволило выявить временную динамику роли каждого фактора в модуляции. Показано, что характер модуляции сильно зависит от полярности общего магнитного поля Солнца. Результаты исследования подтверждают существующие теоретические представления о гелиосферной модуляции, а также отражают ее особенности почти за четыре полных цикла солнечной активности.

Ключевые слова: модуляция космических лучей, межпланетное магнитное поле, нейтральный токовый слой, солнечная активность.

Abstract. The work studies the cumulative modulating effect of the geometry of the interplanetary magnetic field's neutral current sheet and solar activity on propagation of galactic cosmic rays in the heliosphere. The role of each factor on the modulation of cosmic rays is estimated using a method of main components. The application of the method to experimental data on solar activity, to the tilt angle of the neutral sheet, and cosmic ray intensity for a long period from 1980 to 2018 allows us to reveal the temporal dynamics of roles of these factors in the modulation. The modulation character is shown to strongly depend on the polarity of the Sun's general magnetic field. Results of the study confirm the existing theoretical concepts of the heliospheric modulation of cosmic rays and reflect its peculiarities for almost four full cycles of solar activity.

Keywords: cosmic ray modulation, interplanetary magnetic field, neutral current sheet, solar activity.

ВВЕДЕНИЕ

Галактические космические лучи (КЛ), регистрируемые наземными детекторами, отражают крупномасштабное колебание гелиосферы. Длительные наблюдения КЛ показали, что их интенсивность испытывает 11-летние колебания, отрицательно коррели-

рующие с солнечной активностью (СА). Кроме того, поведение этих колебаний зависит от полярности общего магнитного поля Солнца (ОМП) и различно в четных и нечетных циклах СА.

Продолжительное время считалось, что основное модулирующее воздействие на распространение

КЛ в гелиосфере оказывает СА. Однако в последние десятилетия было обнаружено, что наряду с СА КЛ модулируются крупномасштабной геометрией нейтрального токового слоя (НТС) межпланетного магнитного поля (ММП). Такая роль токового слоя обусловлена, вероятнее всего, за счет дрейфа КЛ вдоль него. Действительно, существующие теоретические модели дрейфа КЛ в гелиосфере [Kota, Jokipii, 1983; Burger, 2012] предполагают существование зависимости интенсивности КЛ от геометрии НТС, а именно: при отрицательной полярности ОМПС ($qA < 0$) зависимость между интенсивностью КЛ и углом раствора НТС должна быть существенно сильнее, чем при положительной ($qA > 0$). Качественное сопоставление теоретической модели и экспериментальных данных также подтверждает вышеуказанное предположение [см. напр. Potgieter, Moraal, 1985; Smith, Thomas, 1986; Reinecke et al., 1990]. При этом влияние на уровень модуляции КЛ соотношения между геометрией НТС и уровнем СА может сильно изменяться от одного цикла СА к другому. Отслеживание этого соотношения представляет особый интерес для изучения временной динамики гелиосферной модуляции КЛ. На сегодня имеющийся достаточно длинный ряд экспериментальных данных параметров гелиосферы и КЛ предоставляет такую возможность.

Одним из способов изучения зависимости наблюдаемой интенсивности КЛ от различных солнечных и гелиосферных параметров является корреляционный анализ. Метод позволяет определить роль каждого параметра в модуляции КЛ, а в случае кросс-корреляционного анализа — еще и учесть запаздывание или опережение отклика КЛ. Так, в работе [Usoskin et al., 1998] детально рассмотрена зависимость интенсивности КЛ от уровня СА, а в работе [El-Borie, Hamdy, 2018] — от угла наклона НТС. В [Raouris et al., 2012] исследована зависимость интенсивности КЛ от индексов СА и гелиосферных параметров; в результате была получена эмпирическая модель, состоящая из комбинации разных гелиосферных и солнечных параметров и способная достаточно точно описать наблюдаемую интенсивность. В частности, было установлено, что наилучшее согласие модели с экспериментом достигается при учете следующих параметров: числа солнечных пятен, индекса корональных выбросов массы [Mavromichalaki et al., 2007], напряженности ММП и угла наклона НТС. Как показывают результаты вышеуказанных и других работ (например, [Крайнев, 2012; Gupta et al., 2006]), основным глобальным параметром гелиосферы, модулирующим галактические КЛ, кроме СА, является геометрия НТС.

В данной работе исследуется период с 21-го по 24-й циклы СА. Характеристики временного развития СА за указанный период кратко отражены в работах [Ишков, 2013, 2018]. Указано, что в целом последние четыре цикла СА характеризуются следующими особенностями: 21-й и 22-й циклы относятся к эпохе повышенной СА; в 22-м и 23-м циклах

наблюдалось нарушение правила Гневнышева — Оля: активность Солнца в 22-м цикле стала выше, чем в 23-м; 23-й цикл СА оказался самым продолжительным и низким за последнее столетие; последующий 24-й цикл оказался еще ниже, чем 23-й — он считается началом эпохи низкой СА [Ишков, 2018]. Вышеупомянутые факты свидетельствуют о глобальном переходном периоде СА, который должен отразиться в модуляции галактических КЛ в гелиосфере.

Несколько по-другому обстоит дело с геометрией НТС. Согласно оценкам солнечной обсерватории Wilcox [<http://wso.stanford.edu/gifs/Tilts.gif>], наклон НТС в 21–24-м циклах СА, в отличие от числа солнечных пятен, не сильно изменяется от одного цикла к другому. В частности, наклон НТС достигает своего минимального значения в минимумах СА, где равен $\sim 5^\circ$, и соответственно в максимумах СА наклон, как правило, достигает своего наивысшего значения $\sim 75^\circ$. Однако стоит отметить, что, в отличие от предыдущих циклов, в 23-м цикле спад наклона НТС продолжался дольше.

В работах [Крымский и др., 2001a, 2001b] при помощи метода главных компонент была показана роль геометрии НТС в гелиосферной модуляции КЛ, зарегистрированной в 1982–1988 гг. ($qA < 0$) и 1992–1998 гг. ($qA > 0$) на станциях нейтронных мониторов в Риме, Мак-Мердо и Токио. Было установлено, что зависимость КЛ от угла раствора НТС усиливается при $qA < 0$ (1982–1988 гг.), в то время как при $qA > 0$ (1992–1998 гг.), наоборот, ослабевает. Такое поведение подтверждается теоретическими расчетами [Крайнев, Калинин, 2013]. Впрочем, несмотря на однозначность картины, стоит отметить, что тогда были рассмотрены лишь 21-й и 22-й циклы СА, а на сегодня ряд экспериментальных данных дополнен 23-м и 24-м циклами. С учетом того, что последние циклы оказались поистине аномальными, большой интерес представляет применение к ним подхода, использованного в [Krymsky et al., 2001; Крымский и др., 2001a, б].

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ЗАВИСИМОСТИ МОДУЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ОТ УРОВНЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ВЕЛИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИИ НЕЙТРАЛЬНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ

Отличие данной работы от большинства других работ заключается в применении метода главных компонент, который дает возможность исключения взаимных корреляций исследуемых параметров. Учитывая то, что практически все солнечные и гелиосферные параметры тем или иным образом зависят друг от друга, их взаимная корреляция усложняет процесс выделения доминирующего фактора в модуляции галактических КЛ.

В данной работе предполагается, что основными глобальными гелиосферными факторами являются

уровень СА и форма НТС. В качестве экспериментальных данных по уровню СА были использованы данные по числу солнечных пятен W , предоставляемые Мировым центром данных SILSO [http://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt], а геометрия НТС была определена по углу его раствора χ из расчетов солнечной обсерватории Wilcox на основе классической модели (подробнее см. ссылку [<http://wso.stanford.edu/Tilts.html>]). Предполагается, что все другие факторы оказывают меньшее влияние и, следовательно, ими можно пренебречь.

Интенсивность I галактических КЛ получена по данным регистрации нейтронного монитора станции Оулу (65.05° N, 25.47° E, $R_c \sim 0.8$ ГВ, данные доступны на сайте [<https://cosmicrays oulu.fi>]) за период с января 1982 по декабрь 2018 г. Эти данные (рис. 1) по времени охватывают четыре последних цикла СА и два солнечных магнитных цикла.

Раскроем суть метода главных компонент, который позволяет учитывать коэффициент пропорциональности $k = \tan \alpha$, связывающий оба фактора соотношением $\chi = kW$. Для исключения взаимной зависимости χ и W необходимо перейти к новым переменным:

$$\chi' = \cos \alpha - W \sin \alpha, \quad (1)$$

$$W' = \chi \sin \alpha - W \cos \alpha, \quad (2)$$

которые не коррелируют между собой. После этого, устанавливая связь между $I_1 = \beta_1 \chi'$ и $I_2 = \beta_2 \chi'$, найдем

$$I(\chi, W) = \beta_1 \chi + \beta_2 W + const, \quad (3)$$

$$\beta_1 = \beta_1' \cos \alpha + \beta_2' \sin \alpha, \quad \beta_2 = -\beta_1' \sin \alpha + \beta_2' \cos \alpha, \quad (4)$$

где β_1 и β_2 — коэффициенты пропорциональности [Крымский и др., 2001a, 6]. Восстановленная интенсивность $I(\chi, W)$ отражает интенсивность КЛ, возникающую в результате модуляции КЛ параметрами χ и W . Чем меньше разброс точек между восстанов-

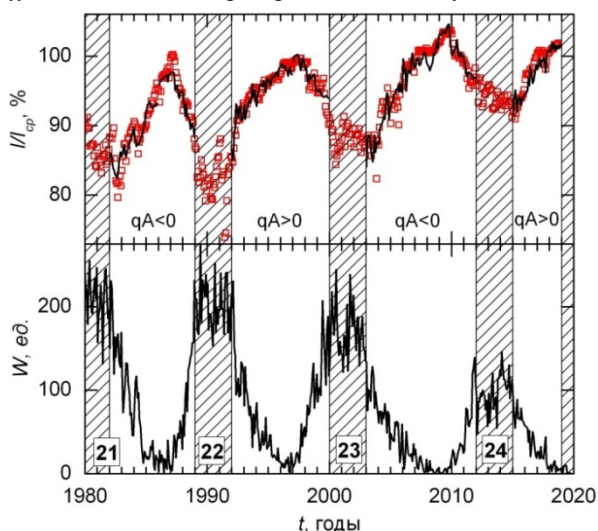


Рис. 1. Верхняя панель — интенсивность галактических КЛ, зарегистрированная на ст. Оулу I/I_{cp} за 1982–2018 гг. (красные квадраты); черная сплошная кривая — интенсивность КЛ $I(\chi, W)$, восстановленная согласно уравнению (3). Нижняя панель — число солнечных пятен по данным [http://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt]. Номера циклов СА и полярность ОМПС показаны в нижней части каждой панели. Периоды переполусовок выделены заштрихованными областями

ленной и наблюдаемой интенсивностями КЛ, тем увереннее можно говорить о том, что лишь эти два параметра являются основными в гелиосферной модуляции КЛ. При этом коэффициенты корреляции R_χ и R_W между восстановленной интенсивностью $I(\chi, W)$ и соответственно параметрами χ и W удобно использовать в качестве показателя модуляционной эффективности уровня СА и формы НТС.

Для успешного применения метода приходится исключить из обработки периоды переполусовок ОМПС, поскольку в эти моменты из-за сильных флуктуаций на Солнце невозможна правильная оценка вклада модулирующих факторов. Кроме того, с целью прослеживания динамики совокупного влияния анализируемых параметров χ и W на интенсивность КЛ от цикла к циклу периоды спада и подъема СА рассматриваются отдельно друг от друга. В результате такого разделения нами были рассмотрены четыре периода спада и три периода роста СА за 1982–2018 гг., список которых представлен в таблице. Видно, что длительность каждого периода составила 3–5 лет. Выбор таких коротких временных интервалов обусловлен целью работы — исследованием роли вышеуказанных факторов на различных фазах СА. При этом необходимо понимать, что в этом случае неизбежно ухудшается достоверность результатов. Тем не менее, мы считаем, что применение метода с указанной вынужденной потерей все равно позволяет достичь поставленной цели.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На рис. 2 показана зависимость интенсивности КЛ $I(\chi, W)$, восстановленной согласно уравнению (3), от угла раствора НТС χ и числа солнечных пятен W на фазах спада и подъема СА в 21–24-м циклах. В таблице представлены рассчитанные за указанные периоды коэффициенты корреляции R_χ и R_W и коэффициенты пропорциональности $I(\chi, W)/\chi$ и $I(\chi, W)/W$. Как видно из рис. 2 и таблицы, на протяжении четырех циклов СА зависимость между $I(\chi, W)$ и обоими параметрами χ и W достаточно сильная: коэффициенты линейной корреляции R_χ и R_W имеют довольно высокие значения от 0.87 почти до строго линейной зависимости. При этом видно, что соотношение между R_χ и R_W меняется определенным образом в зависимости от полярности ОМПС и фазы цикла СА. Во-первых, во всех трех периодах подъема СА $R_\chi > R_W$. Во-вторых, в периоды спада СА соотношение между этими коэффициентами неоднозначно: при $qA < 0$ $R_\chi > R_W$, а при $qA > 0$, наоборот, $R_\chi < R_W$. Соотношение $R_\chi > R_W$ свидетельствует о доминировании роли формы НТС над СА в модуляции КЛ и, наоборот, $R_\chi < R_W$ свидетельствует о преимущественной роли СА. Согласно существующей теории, при $qA < 0$ дрейф КЛ направлен из области низких гелиоширот вдоль НТС и, как следствие, возрастает роль формы НТС в модуляции КЛ, а при $qA > 0$ дрейф КЛ направлен преимущественно с высоких гелиоширот, что приводит к уменьшению взаимодействия КЛ с НТС и соответственно увеличению роли СА в модуляции КЛ [Крымский и др., 2001a; Kota,

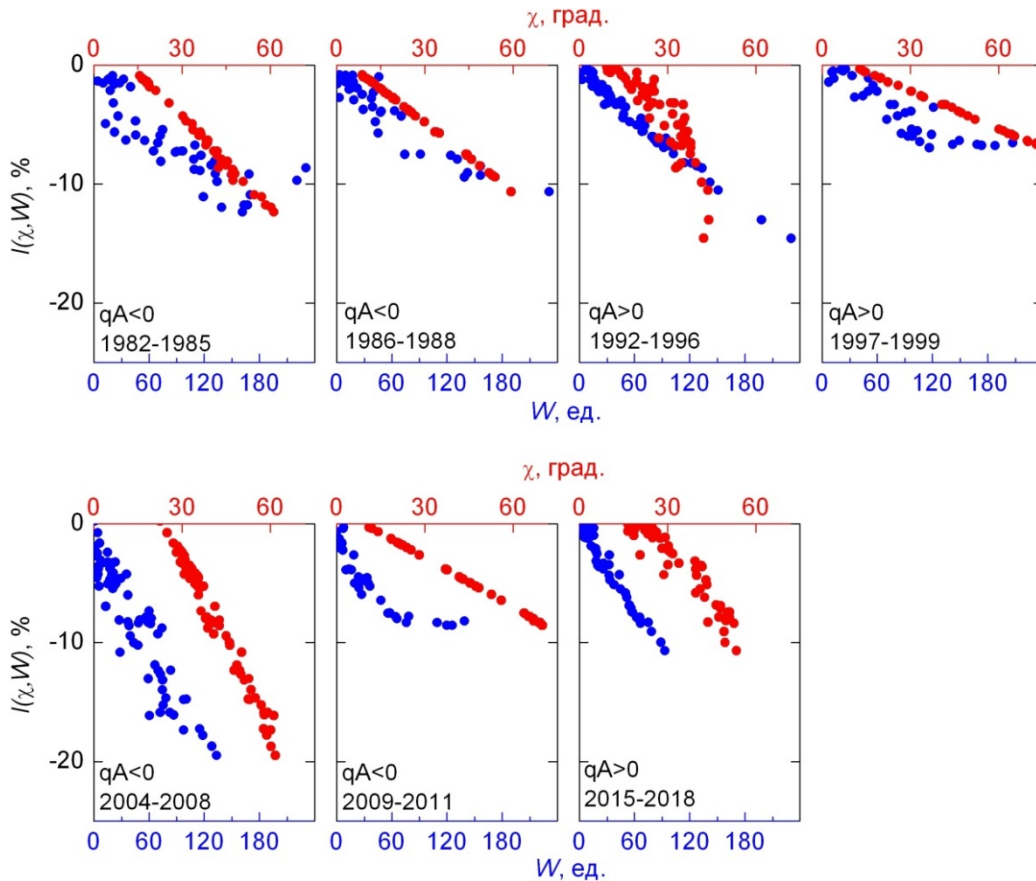


Рис. 2. Зависимость восстановленной интенсивности КЛ $I(\chi, W)$ от числа солнечных пятен W (синие кружки) и наклона нейтральной поверхности χ (красные кружки) в периоды спада и подъема уровня СА за 1982–2018 гг.

Таблица

Полярность ОМПС, коэффициенты корреляции R_χ и R_W , а также доля восстановленной интенсивности КЛ $I(\chi, W)$ (%) относительно числа солнечных пятен W и угла раствора НТС χ для периодов спада и подъема уровня СА за 1982–2018 гг.

№	Период, гг.	Полярность ОМПС	R_χ	R_W	$I(\chi, W)/\chi, \%/град$	$I(\chi, W)/W, \%/ед.$
1	1982–1985	$qA < 0$	-0.997 ± 0.011	-0.866 ± 0.072	-0.25	-0.05
2	1986–1988		-0.999 ± 0.003	-0.933 ± 0.060	-0.19	-0.05
3	1992–1996	$qA > 0$	-0.868 ± 0.064	-0.990 ± 0.018	-0.30	-0.06
4	1997–1999		-0.999 ± 0.004	-0.873 ± 0.081	-0.10	-0.04
5	2004–2008	$qA < 0$	-0.965 ± 0.034	-0.904 ± 0.055	-0.45	-0.13
6	2009–2011		-0.999 ± 0.003	-0.874 ± 0.081	-0.14	-0.06
7	2015–2018	$qA > 0$	-0.936 ± 0.051	-0.986 ± 0.024	-0.26	-0.12

Jokipii, 1983; Potgieter, Moraal, 1985; Smith, Thomas, 1986; Reinecke et al., 1990; Burger, 2012; Крайнев, 2012]. Можно сделать вывод, что полученные нами результаты расчетов в целом согласуются с представлениями о дрейфовом движении КЛ в гелиосфере за исключением периода подъема СА в 1997–1999 гг., где вопреки ожиданиям $R_\chi > R_W$. Видимо, это связано со следующими обстоятельствами: во-первых, отобранный период достаточно короткий;

во-вторых, в данной работе мы игнорировали известный факт запаздывания отклика КЛ на вариации гелиосферных параметров (см., например, [Usoskin et al., 1998; Mavromichalaki et al., 2007; Tomassetti et al., 2017; Iskra et al., 2019]). Однако выбор более широкого периода невозможен, так как расширение интервала в сторону максимума СА привело бы к увеличению искажающего влияния спорадических потоков солнечного ветра. Что касается влияния за-

паздывания, выполненные нами предварительные расчеты в предположении, что время запаздывания составляет примерно один год, существенно не изменили общую картину. С другой стороны, среди рассмотренных нами периодов этот является единственным периодом спада СА при $qA > 0$. Поэтому для однозначного ответа на данный вопрос необходимо дождаться следующего аналогичного периода — начала 25-го цикла СА.

Коэффициенты пропорциональности $I(\chi, W)/\chi$ и $I(\chi, W)/W$, представленные в таблице, отражают зависимости восстановленной интенсивности КЛ от формы НТС и уровня СА соответственно. Видно, что эти коэффициенты обнаруживают следующее поведение: $I(\chi, W)/\chi$ имеет разные значения на разных фазах СА — его величина во время спада СА всегда выше, чем во время фазы роста и колеблется в пределах значений 0.1–0.45 %/град.; $I(\chi, W)/W$ имеет в среднем значение, близкое к 0.05 %/ед., но в некоторые периоды резко возрастает в 2–3 раза. Из таблицы видно, что последние два цикла СА характеризуются повышенными значениями коэффициентов по сравнению с предыдущими.

Минимум СА между 23-м и 24-м циклами является периодом необычайно длительного ослабления гелиосферной модуляции КЛ, во время которой интенсивность КЛ достигла максимальных значений за весь период наземных наблюдений [Zhao et al., 2014; Gushchina et al., 2014]. Можно предположить, что полученные нами завышенные значения коэффициентов пропорциональности в последних двух циклах СА связаны с заполнением модулирующего объема гелиосферы галактическими КЛ в условиях длительной низкой СА. Такое заполнение происходит инерционно и, как следствие, чем дольше сохраняется низкий уровень СА, тем больше возрастает интенсивность КЛ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью метода главных компонент исследовано совокупное влияние уровня СА и наклона нейтральной поверхности ММП на модуляцию галактических КЛ в гелиосфере в отдельные периоды последних четырех циклов СА. Показано, что при $qA < 0$ модуляция КЛ преимущественно определяется геометрией токового слоя, а при $qA > 0$ — уровнем СА. Полученные результаты подтверждают существующие теоретические представления о дрейфовом движении КЛ в гелиосфере. При этом получен результат, не согласующийся с теорией, — во время фазы роста СА при $qA > 0$ модуляция КЛ происходила преимущественно за счет изменения геометрии НТС. Указанный факт требует дальнейшего изучения.

Работа выполнена в рамках государственного контракта АААА–А17–117021450058–6. Авторы благодарят сотрудников солнечной обсерватории Wilcox [<http://wso.stanford.edu>], мирового центра данных SILSO [http://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt], станции КЛ Университета Оулу и геофизической обсерватории Соданкюля [<https://cosmi-crays.oulu.fi>] за предоставление данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ишков В.Н. Периоды пониженной и повышенной солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013»: Труды. Санкт-Петербург, 2013. С. 111–114.
- Ишков В.Н. Космическая погода и особенности развития текущего 24-го цикла солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. 2018. Т. 58, № 6. С. 785–800. DOI: [10.1134/S0016794018060056](https://doi.org/10.1134/S0016794018060056).
- Крайнев М.Б. О характеристиках гелиосферы, важных для галактических космических лучей, в фазе минимума солнечной активности // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2012. № 6. С. 13–20.
- Крайнев М.Б., Калинин М.С. О структуре интенсивности галактических космических лучей при ее долговременных вариациях // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77, № 5. С. 574–576.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К. и др. Модуляция космических лучей гелиосферным нейтральным слоем // Геомагнетизм и аэронавигация. 2001а. Т. 41, № 4. С. 444–449.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К. и др. Нейтральный слой и дрейф частиц в долгопериодных вариациях космических лучей // Изв. РАН. Сер. физ. 2001б. Т. 65, № 3. С. 353–355.
- Burger R.A. Modeling drift along the heliospheric wavy neutral sheet // The Astrophys. J. 2012. V. 760, N 1. P. 1–5. DOI: [10.1088/0004-637X/760/1/60](https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/1/60).
- El-Borie M.A., Hamdy A. A correlative study between heliospheric current sheet tilts, cosmic ray intensities and solar activity parameters // Arab J. Nucl. Sci. Appl. 2018. V. 51, N 1. P. 152–167.
- Gupta M., Mishra V.K., Mishra A.P. Cosmic ray intensity associated with sunspot numbers and tilt angle // Indian J. Phys. 2006. V. 80, N 7. P. 697–701.
- Gushina R.T., Belov A.V., Eroshenko E.A., et al. Cosmic ray modulation during the solar activity growth phase of cycle 24 // Geomagnetism and Aeronomy. 2014. V. 54, N 4. P. 430–436. DOI: [10.1134/S0016793214040057](https://doi.org/10.1134/S0016793214040057).
- Iskra K., Soluszyk M., Alania M., Wozniak W. Experimental investigation of the delay time in galactic cosmic ray flux in different epochs of solar magnetic cycles: 1959–2014 // Solar Phys. 2019. V. 294. P. 115. DOI: [10.1007/s11207-019-1509-4](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1509-4).
- Kota J., Jokipii J.R. Effects of drift on the transport of cosmic rays. VI. A three-dimensional model including diffusion // The Astrophys. J. 1983. V. 265. P. 573–581.
- Krymsky G.F., Krivoschapkin P.A., Gerasimova S.K., et al. Deformation of the heliospheric current sheet as a reason of long-term cosmic ray variations // Proc. 27th ICRC 2001. Hamburg. Germany. 2001. P. 3871–3873.
- Mavromichalaki H., Paouris E., Karalidi T. Cosmic ray modulation: an empirical relation with solar and heliospheric parameters // Solar Phys. 2007. V. 245. P. 369–390. DOI: [10.1007/s11207-007-9043-1](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9043-1).
- Paouris E., Mavromichalaki H., Belov A., et al. Galactic cosmic ray modulation and the last solar minimum // Solar Phys. 2012. V. 280. P. 255–271. DOI: [10.1007/s11207-012-0051-4](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0051-4).
- Potgieter M.S., Moraal H. A drift model for the modulation of galactic cosmic rays // The Astrophys. J. 1985. V. 294. P. 425–440.
- Reinecke L.J.P., Potgieter S.M., van Staden I.M. The neutral sheet tilt dependence of cosmic ray neutron monitor intensities at different cutoff rigidities // Proc. 21st ICRC. Adelaide. Australia. 1990. V. 6. P. 95–98.
- Smith E.J., Thomas B.T. Latitudinal extent of the heliospheric current sheet and modulation of galactic cosmic rays //

J. Geophys. Res. 1986. V. 91, N A3. P. 2933–2942. DOI: [10.1029/JA091iA03p02933](https://doi.org/10.1029/JA091iA03p02933).

Usoskin I.G., Kananen H., Mursula K., et al. Correlative study of solar activity and cosmic ray intensity // J. Geophys. Res. 1998. V. 103, N 5. P. 9567–9574. DOI: [10.1029/97JA03782](https://doi.org/10.1029/97JA03782).

Tomassetti N., Orcinha M., Barão F., Bertucci B. Evidence for a time lag in solar modulation of galactic cosmic rays // The Astrophys. J. Lett. 2017. V. 849, N L32 (6 pp). DOI: [10.3847/2041-8213/aa9373](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9373).

Zhao L.-L., Qin G., Zang M., et al. Modulation of galactic cosmic ray during the unusual solar minimum between cycles 23 and 24 // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119, iss. 3. P. 1493–1506. DOI: [10.1002/2013JA019550](https://doi.org/10.1002/2013JA019550).

URL: <http://wso.stanford.edu/gifs/Tilts.gif> (дата обращения 11 ноября 2019 г.).

URL: http://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt (дата обращения 11 ноября 2019 г.).

URL: <https://cosmicrays.oulu.fi> (дата обращения 11 ноября 2019 г.).

REFERENCES

El-Borie M.A., Hamdy A. A correlative study between heliospheric current sheet tilts, cosmic ray intensities and solar activity parameters. *Arab J. Nucl. Sci. Appl.* 2018, vol. 51, no. 1, pp. 152–167.

Burger R.A. Modeling drift along the heliospheric wavy neutral sheet. *The Astrophys. J.* 2012, vol. 760, no 1, pp.1–5. DOI: [10.1088/0004-637X/760/1/60](https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/1/60).

Gupta M., Mishra V.K., Mishra A.P. Cosmic ray intensity associated with sunspot numbers and tilt angle. *Indian J. Phys.* 2006, vol. 80, no. 7, pp. 697–701.

Gushchina R.T., Belov A.V., Eroshenko E.A., Obridko V.N., Paouris E., Shelting B.D. Cosmic ray modulation during the solar activity growth phase of cycle 24. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014, vol. 54, iss. 4, pp. 430–436. DOI: [10.1134/S0016793214040057](https://doi.org/10.1134/S0016793214040057).

Iskhov V.N. Reduced and extended periods of solar activity: monitoring features and key facts. *Vserossiiskaya ezhegodnaya konferentsiya po fizike Solntsa “Solnechnaya i solnechno-zemnaya fizika — 2013”*: Trudy [Proc. Russian National Annual Conference on Solar Physics “Solar and Solar-Terrestrial Physics – 2013”] Saint-Peretsburg, 2013, pp. 111–114. (In Russian).

Iskhov V.N. Space weather and specific features of the development of current solar cycle. *Geomagnetism and aeronomy.* 2018, vol. 58, no. 6, pp. 753–767. DOI: [10.1134/S0016793218060051](https://doi.org/10.1134/S0016793218060051).

Iskra K., Soluszyk M., Alania M., Wozniak W. Experimental investigation of the delay time in galactic cosmic ray flux in different epochs of solar magnetic cycles: 1959–2014. *Solar Phys.* 2019, vol. 294, iss. 9, article id. 115, 14 p. DOI: [10.1007/s11207-019-1509-4](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1509-4).

Kota J., Jokipii J.R. Effects of drift on the transport of cosmic rays. VI. A three-dimensional model including diffusion. *The Astrophys. J.* 1983, vol. 265, pp. 573–581.

Kraiev M.B. Characteristics of the heliosphere important for galactic cosmic rays in the phase of minimal solar activity // *Kratkie soobshcheniya po fizike FIAN* [Brief Information on Physics by Lebedev Physical Institute RAS]. 2012, no. 6, pp. 13–20. (In Russian).

Kraiev M.B., Kalinin M.S. On the structure of galactic cosmic ray intensity during its long-term variations. *Bull. of the Russian Academy of Sciences: Physics.* 2013, vol. 77, no. 5, pp. 510–512. DOI: [10.3103/S1062873813050316](https://doi.org/10.3103/S1062873813050316).

Krymsky G.F., Krivoshapkin P.A., Gerasimova S.K., Grigoryev V.G., Mamrukova V.P. Modulation of cosmic rays by the heliospheric neutral sheet. *Geomagnetizm i ajeonomija* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2001a, vol. 41, no. 4, pp. 444–449. (In Russian).

Krymsky G.F., Krivoshapkin P.A., Gerasimova S.K., Grigoryev V.G., Mamrukova V.P. Neutral sheet and drift of particles in long-period cosmic rays variations. *Izvestiya RAN. Ser. fizicheskaya* [Bull. of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2001b, vol. 65, no. 3, pp. 353–355. (In Russian).

Krymsky G.F., Krivoshapkin P.A., Gerasimova S.K., Grigoryev V.G., Mamrukova V.P. Deformation of the heliospheric current sheet as a reason of long-term cosmic ray variations. *Proc. 27th ICRC 2001*. Hamburg. Germany. 2001, pp. 3871–3873.

Mavromichalaki H., Paouris E., Karalidi T. Cosmic-ray modulation: an empirical relation with solar and heliospheric parameters. *Solar Phys.* 2007, vol. 245, pp. 369–390. DOI: [10.1007/s11207-007-9043-1](https://doi.org/10.1007/s11207-007-9043-1).

Paouris E., Mavromichalaki H., Belov A., Gushchina R.T. Galactic cosmic ray modulation and the last solar minimum. *Solar Phys.* 2012, vol. 280, pp. 255–271. DOI: [10.1007/s11207-012-0051-4](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0051-4).

Potgieter M.S., Moraal H. A drift model for the modulation of galactic cosmic rays. *The Astrophys. J.* 1985, vol. 294, pp. 425–440.

Reinecke L.J.P., Potgieter S.M., van Staden I.M. The neutral sheet tilt dependence of cosmic ray neutron monitor intensities at different cutoff rigidities. *Proc. 21st ICRC*. Adelaide. Australia. 1990, vol. 6, pp. 95–98.

Smith E.J., Thomas B.T. Latitudinal extent of the heliospheric current sheet and modulation of galactic cosmic rays. *J. Geophys. Res.* 1986. vol. 91, no. A3. P. 2933–2942. DOI: [10.1029/JA091iA03p02933](https://doi.org/10.1029/JA091iA03p02933).

Usoskin I.G., Kananen H., Mursula K., Tanskanen P., Kovaltsov G.A. Correlative study of solar activity and cosmic ray intensity. *J. Geophys. Res.* 1998, vol. 103, no. 5, pp. 9567–9574. DOI: [10.1029/97JA03782](https://doi.org/10.1029/97JA03782).

Tomassetti N., Orcinha M., Barão F., Bertucci B. Evidence for a time lag in solar modulation of galactic cosmic rays. *The Astrophys. J. Lett.* 2017, vol. 849, no. L32, 6 p. DOI: [10.3847/2041-8213/aa9373](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9373).

Zhao L.-L., Qin G., Zang M., Heber B. Modulation of galactic cosmic ray during the unusual solar minimum between cycles 23 and 24. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, iss. 3, pp. 1493–1506. DOI: [10.1002/2013JA019550](https://doi.org/10.1002/2013JA019550).

URL: <http://wso.stanford.edu/gifs/Tilts.gif> (accessed November 11, 2019).

URL: http://www.sidc.be/silso/DATA/SN_m_tot_V2.0.txt (accessed November 11, 2019).

URL: <https://cosmicrays.oulu.fi> (accessed November 11, 2019).

Как цитировать эту статью

Гололобов П.Ю., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф., Герасимова С.К. Исследование методом главных компонент влияния геометрии нейтрального токового слоя гелиосферы и солнечной активности на модуляцию галактических космических лучей. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 1. С. 30–35. DOI: [10.12737/szf-61202002](https://doi.org/10.12737/szf-61202002).