

ПРОГНОЗ МОДУЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С ЖЕСТКОСТЬЮ 10 ГВ В 25-М ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2024 г. В. Г. Янке^{1, *}, А. В. Белов¹, Р. Т. Гущина¹, П. Г. Кобелев^{1, **}, Л. А. Трефилова¹

¹ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

*e-mail: yanke@izmiran.ru

**e-mail: kobelev@izmiran.ru

Поступила в редакцию 11.09.2023 г.

После доработки 09.11.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

На основе прогноза параметров солнечной активности и разработанной нами модели модуляции галактических космических лучей выполнен прогноз вариаций космических лучей в 25-м цикле солнечной активности. В основе прогноза потока космических лучей лежит корреляционная связь с числом солнечных пятен (однопараметрическая модель) или с набором солнечных (в основном, магнитных) параметров (многопараметрическая модель). Прогноз числа солнечных пятен был взят из опубликованных данных, прогноз других солнечных параметров выполнен в работе. Показано, что вариации космических лучей за три года текущего 25-го цикла в целом не противоречат прогнозам и говорят о том, что 25-й цикл солнечной активности ожидается незначительно более активным по сравнению с 24-м циклом солнечной активности.

DOI: 10.31857/S0016794024020064, EDN: DZADMD

1. ВВЕДЕНИЕ

Уже в ранний период наземных наблюдений галактических космических лучей (КЛ) стало ясно, что долгопериодные вариации интенсивности определяются солнечной активностью (СА). В эти годы были разработаны общие представления о гелиосфере и созданы основы теории модуляции галактических КЛ [Parker, 1958; 1963; 1965; Крымский, 1964]. Современному уровню понимания проблемы распространения КЛ и их модуляции в гелиосфере посвящены, например, обзоры [Martucci et al., 2018; Rankin et al., 2022 и ссылки к ним], где изложены вопросы развития основных моделей солнечной модуляции КЛ. В этих работах также рассмотрены вопросы зарядовой зависимости модуляции на основе результатов, полученных с помощью измерений на двух космических аппаратах (КА) “Вояджер”, наблюдений на PAMELA и продолжающихся высокоточных измерениях на AMS-02. Измерения на этих КА позволяют получить новые данные, которые в сочетании со сложными численными моделями продолжают приносить знания о космических лучах и об их взаимодействии с глобальной гелиосферой и внутри нее.

Интенсивность галактических КЛ у Земли, как и во всей внутренней гелиосфере, уменьшается при высокой солнечной активности и возрастает при низкой. Изменения на Солнце (прежде всего солнечных магнитных полей) определяют изменения гелиосферы, т. е. области модуляции КЛ. Одиннадцатилетний солнечный цикл проявляется в наземных наблюдениях КЛ столь же явно, как и в основных солнечных индексах, таких как число солнечных пятен, но находится с ними в антикорреляции.

В цикле солнечной активности [Nathaway et al., 2015; Petrovay, 2020] меняется напряженность солнечных и межпланетных магнитных полей и изменяется структура гелиомагнитосферы, которая упрощается в минимуме активности и усложняется в максимуме. Долгопериодные изменения структуры, в основном, связаны с формой гелиосферного токового слоя. Полярность общего магнитного поля меняется с еще большим периодом, а именно, с солнечным двадцатидвухлетним магнитным циклом. Более короткопериодными факторами, определяющими сравнительно тонкую структуру гелиосферы, являются выбросы солнечного вещества и приэкваторальные корональные дыры. Все это не может не влиять на галактические КЛ [Дорман, 1963; Крымский, 1981; 2001].

На протяжении ряда лет в ИЗМИРАН разрабатывается многопараметрическая полуэмпирическая модель долгопериодных вариаций галактических КЛ, например, [Белов и др., 2005; 2018; Гущина и др., 2013; Янке и др., 2021; 2022], объединяющая влияние всех перечисленных факторов. Показано, что циклические изменения солнечных индексов (среднее и полярное магнитное поле, наклон гелиосферного токового слоя, индекс СМЕ [Белов и Гущина, 2018] и площадь приэкваториальных корональных дыр) хорошо описывают поведение галактических КЛ в последних циклах. Кроме того эти модельные построения используются для определения остаточной модуляции КЛ [Янке и др., 2023].

Цель данной работы — прогноз вариаций ГКЛ в 25-м цикле. Наша модель дала бы достаточно надежный прогноз, если бы мы знали, как будут меняться солнечные индексы. К сожалению, долгосрочное прогнозирование солнечной активности еще недостаточно развито: почти все солнечные индексы совсем не прогнозируются, активно прогнозируется только число солнечных пятен, индекс, имеющий на сегодня самый длинный ряд наблюдений (примерно 300 лет). Перед каждым солнечным циклом появляются многие десятки разноречивых прогнозов, что само по себе говорит об отсутствии надежной общепринятой прогностической методики. Число солнечных пятен не имеет прямой физической связи с вариациями галактических КЛ и не является лучшим выбором для наших целей, но этот индекс достаточно хорош, главным образом потому, что он коррелирует с другими индексами, и на нём не случайно основаны различные стандарты для практических применений. В этой работе мы используем число солнечных пятен в одном из вариантов прогноза (однопараметрическое приближение). Для прогнозирования максимального числа солнечных пятен в цикле и его временного хода было создано много методов прогнозирования. Все методы прогноза (климатологический, современный климатологический, спектральный, метод геомагнитных предвестников, модели динамо и модели на основе нейронных сетей) кратко изложены в [Pesnell, 2012; 2018], а в работе [Pesnell, 2012] 75 прогнозов числа солнечных пятен были проанализированы по категориям для 24-го цикла.

Другой подход, напрашивающийся при отсутствии необходимых нам солнечных индексов — предположить, что Солнце в 25-м цикле будет похоже на предыдущие нечётные циклы. Однако такое предположение вряд ли будет верным. Дело в том, что на Солнце в последние два десятилетия произошли большие изменения, все солнечные магнитные поля существенно ослабли [Cliver et al., 2010; 2017]. Поэтому маловероятно, что Солнце

в текущем цикле будет вести себя аналогично нечётным циклам XX века, включая недавний 23-й цикл. В сложившейся ситуации лучше ориентироваться на данные последнего 24-го цикла, хотя он и находится на другой ветви солнечного магнитного цикла. В варианте прогноза с помощью многопараметрической модели мы опираемся на данные последних двух циклов. Другой вариант прогноза параметров солнечной активности дает математическая модель ARIMA (обсуждение модели в разделе 2), которая обладает прогностическими свойствами.

Интерес к прогнозу солнечной активности обусловлен научными задачами, поскольку понимание солнечной активности, как и в любой наблюдательной науке, проверяется точностью ее прогноза. Интерес обусловлен также практическими задачами, связанными с деятельностью человека на Земле и в космосе. Действительно, прогнозы солнечной активности, включая прогнозы максимального значения и времени солнечного максимума, могут иметь большое значение для планирования продолжительных космических миссий, также они позволяют обеспечить защиту планетарных технологий и осведомленность о космической ситуации. Например, срок службы любого проектируемого космического аппарата будет зависеть от ожидаемой величины солнечной активности, и долгосрочные надежные прогнозы солнечной активности будут важной предпосылкой для его продолжительного функционирования. Из-за влияния Солнца на космическую погоду, на окружающую среду и климат Земли, необходимо прогнозировать и знать заранее различные физические параметры, такие как экстремальные значения и продолжительность будущего солнечного цикла.

Как уже было замечено, число солнечных пятен не является универсальным показателем солнечной активности. Физически более обоснован набор таких параметров как полярное и среднее магнитное поле Солнца, угол наклона гелиосферного токового слоя, площадь приэкваториальных корональных дыр, индекс спорадического проявления СА, определяемый как взвешенное число корональных выбросов вещества (*CMEi*-индекс). Прогноз всех этих параметров был выполнен нами в рамках настоящей работы.

Впервые прогноз долгопериодных вариаций космических лучей на основе различных индексов солнечной активности для 24-го цикла СА был выполнен в работе [Белов и др., 2005], где максимум интенсивности космических лучей прогнозировался на 2006—2007 гг. Прогноз на ~2 г. опередил фактический максимум и связан с известной сегодня аномальностью этого периода СА [Гущина и др., 2013].

Задачи работы: 1. Провести анализ опубликованных прогнозов числа солнечных пятен для 25-го цикла СА. 2. Выполнить прогноз физически обоснованного набора параметров — полярного и среднего магнитного поля Солнца, угла наклона гелиосферного токового слоя и т.д. 3. Построить многопараметрическую модель вариаций галактических КЛ для энергий 10 ГэВ. 4. Для различных сценариев выполнить прогноз интенсивности галактических космических лучей для 25-го цикла СА.

2. ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Из-за наблюдаемого ослабления солнечной активности в течение последних двух циклов (23 и 24-го), прогнозу 25-го солнечного цикла в настоящее время уделено большое внимание. При сохранении этой тенденции 25-й цикл предположительно мог бы оказаться еще слабее. Однако есть и другой вариант. Некоторые недавние исследования показывают, что эта тенденция к ослаблению прервется, и предстоящий солнечный цикл будет сильнее, чем 24-й цикл [Sarp et al., 2018; Li et al., 2018; Ишков, 2020, 2022].

По данным архивов [Labonville et al., 2019; Miao et al., 2020; Nandy, 2021] на рис. 1 представлены прогнозируемые максимальные числа солнечных пятен для 25-го солнечного цикла. Прогнозы были выполнены с использованием различных методов и имеют большой разброс значений от 60 до 230, которые можно разделить на две группы. Из первой группы значений мы использовали результаты раннего прогноза максимального числа солнечных пятен и момента его достижения равного 115 ± 17 (2025.6 ± 0.6) из работы [NASA/NOAA, 2019], из второй — 135 ± 25 (2025.2 ± 1.5) [Pesnell et al., 2018] квадраты на рис. 1. При отборе прогнозов учитывалось, предлагается ли временная зависимость числа солнечных пятен в полном цикле, в противном случае используется колоколообразная форма прогнозируемого параметра.

Временной ход числа солнечных пятен для двух вышеупомянутых прогнозов представлен на рис. 2, на котором приводится также средний временной ход для всего наблюдательного периода. После трех лет эволюции измеренная кривая развития 25-го цикла СА на фазе роста (<https://services.swpc.noaa.gov/json>) проходит выше прогнозируемых значений, что означает возможное усиление 25-го цикла относительно 24-го солнечного цикла. Уже ясно, что 25-й цикл развивается быстрее, чем ожидалось.

Более сложной является задача прогноза других параметров солнечной активности, в первую очередь, это связано с коротким экспериментальным

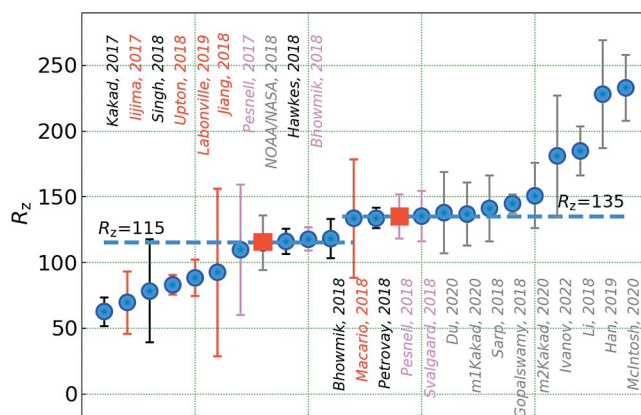


Рис. 1. Разброс прогнозируемого максимального числа солнечных пятен для 25-го солнечного цикла. Квадраты — прогнозируемые значения по данным NOAA/NASA [NASA/NOAA, 2019] и работы [Pesnell et al., 2018].

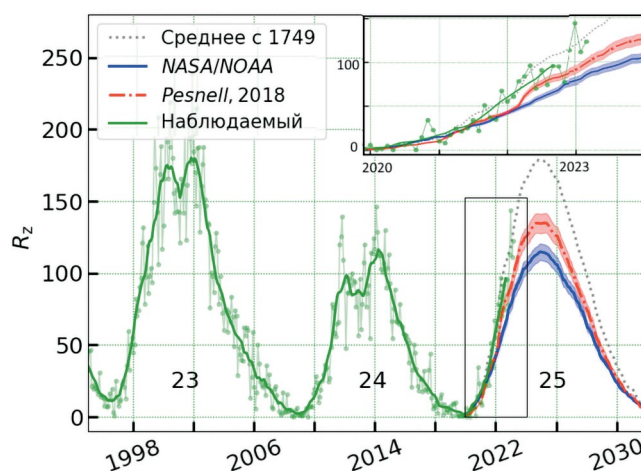


Рис. 2. Наблюдаемые (среднемесячные и 13-месячные сглаженные для 23-го и 24-го циклов) и прогнозируемые числа солнечных пятен из работ [NASA/NOAA, 2019] и [Pesnell et al., 2018]. Точки — средние значения числа солнечных пятен, полученные для всего наблюдательного периода.

периодом наблюдения этих параметров. Для построения многопараметрической модели вариаций КЛ использовался следующий набор параметров. Это полярное магнитное поле Солнца B_{pole} (<https://wso.stanford.edu/Polar.html>), среднее магнитное поле Солнца на поверхности источника ($2.5 R_{\odot}$) солнечного ветра B_{ss} (<http://wso.stanford.edu>) [Obridko et al., 1999], угол наклона гелиосферного токового слоя η_{HCS} (<http://wso.stanford.edu/Tilts.html>), CMEi индекс [Belov et al., 2018] и площадь приэкваториальных корональных дыр A_i [Гушина и др., 2016].

С низкого уровня СА, отличавшего 24-й цикл, стартовал и 25-й цикл.

Действительно:

1) полярное поле Солнца B_{pole} в 24-м цикле СА относительно двух предыдущих циклов снизилось практически вдвое; однако, как показало моделирование, вклад этого фактора в полную вариацию космических лучей для этого периода незначителен;

2) сегодня известно о значительном уменьшении коронального магнитного поля Солнца во время 24-го цикла СА [Cliver et al., 2011, 2017];

3) наклон гелиосферного токового слоя при спокойном Солнце для всех циклов СА невелик и плохо измеряется при значениях $>70^\circ$. Вариации наклона слабо меняются от цикла к циклу, но они важны при оценке общей модуляции космических лучей;

4) в работе [Shi et al., 2022] отмечено, что в 24-м цикле СА относительно 23-го вдвое снизилась скорость вспыхивающих корональных выбросов массы (КВМ), кроме того, уменьшилось и их количество, хотя общее число КВМ в 24-м цикле увеличилось. То есть в целом модулирующая способность КВМ в 24-м цикле СА уменьшилась, как и их вклад в полную вариацию космических лучей;

5) площадь приэкваториальных корональных дыр A_i в 24-м цикле СА относительно 23-го несколько снизилась, однако вклад этого фактора в полную вариацию космических лучей незначителен ($<1\%$).

Прогноз этих параметров на 25-й цикл был выполнен двумя методами: на основе эмпирической модели (анализируя поведения параметров в 23-м и 24-м циклах), и модели ARIMA [Bajaj, 2023; Rob et al., 2014]. ARIMA это интегрированная модель авторегрессии и скользящего среднего с использованием параметра сезонности, с помощью которой можно представить солнечный цикл как вынужденный и слабо затухающий гармонический осциллятор, на который воздействуют долгопериодные ~ 11 - или ~ 22 -летние колебания.

Результат приведен на рис. 3 для пяти экспериментально измеренных и прогнозируемых параметров. При прогнозировании из возможных вариантов прогноза отбирались минимальный и максимальный, после чего формировался доверительный интервал. Например (верхняя панель рис. 3), при прогнозировании с помощью модели ARIMA полярного поля Солнца B_{pole} был выполнен отбор решений ARIMA(1,1,3)(1,1,0)₂₂ и ARIMA(1,1,3)(0,1,1)₂₂ с минимальным порядком авторегрессионной модели, интегрирования и скользящего среднего с указанием сезонности в виде нижнего индекса [Bajaj, 2023; Rob et al., 2014]. Видно, что для параметров B_{pole} , B_{ss} , η_{HCS} и CMEi-индекса два независимых метода прогнозирования дают хорошее согласие, менее однозначны прогнозы площади приэкваториальных корональных дыр A_i .

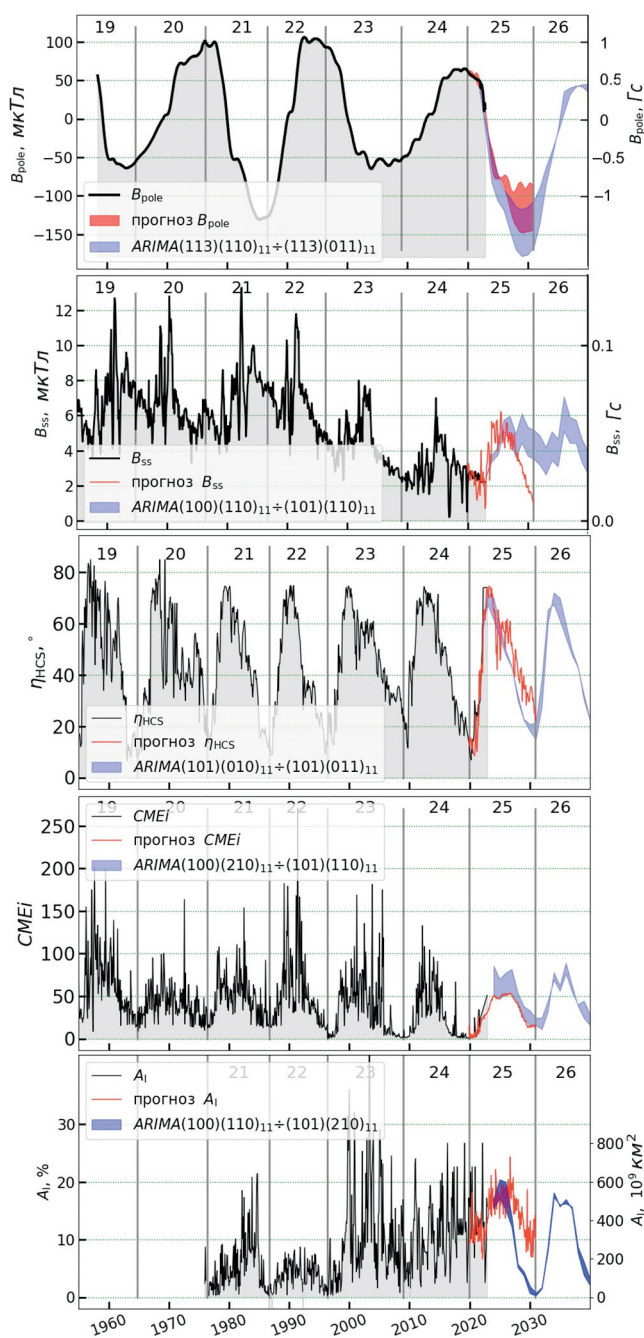


Рис. 3. Измеренные (или вычисленные) и прогнозируемые эмпирическим (25-й цикл) и ARIMA методами (25 и 26-й циклы) параметры СА.

3. МОДЕЛЬ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Прогноз вариаций космических лучей опирается на модели вариаций космических лучей. Исходя из опыта разработок предыдущих моделей [Белов и др., 2018; Янке и др., 2022], для построения модели была определена оптимальная комбинация солнечных и гелиосферных

индексов. Это 5 индексов, которые были описаны выше: $X_k = (B_{\text{pole}}, B_{\text{ss}}, \eta_{\text{HCS}}, \text{CMEi}, A_1)$.

Модель вариаций космических лучей $v(t)$ для выбранных солнечных и гелиосферных индексов имеет вид:

$$v(t) = a_0 + \sum a_k \times X_k(t) + \sigma(t), \quad (1)$$

где a_k — определяемые коэффициенты уравнения регрессии; max — число параметров (факторов) модели; переменная $X_k^*(t) = \frac{\sum_{\tau=0}^{\tau_m} X_k(t-\tau)}{\tau_m + 1}$ — усредненное значение параметра X_k , учитывающее время запаздывания для каждого параметра относительно интенсивности космических лучей τ_m . При решении линейной системы уравнений (1) времена запаздывания для различных факторов определялись методом поиска максимального значения множественного коэффициента детерминации R^2 и минимизации среднеквадратичной ошибки σ .

В результате решения уравнения (1) определяются коэффициенты уравнения регрессии a_k и времена запаздывания $\tau_{\text{Bpole}}, \tau_{\text{Bss}}, \tau_{\eta}, \tau_{\text{CMEi}}, \tau_{A_1}$. Проводится проверка адекватности и оценка точности модели путем сравнения с имеющимися экспериментальными данными. Такой подход позволяет достичь точности модели вариаций космических лучей в несколько процентов.

Другой вариант — модель одного параметра, например числа солнечных пятен R_z , $v = f(R_z)$ с учетом времени запаздывания τ_m можно записать как:

$$v(t) = a_0 + a_1 \times R_z(t) + \sigma(t), \quad (2)$$

где $R_z(t)$ (в дальнейшем верхний индекс не указывается) определяется средним значением времени задержки за предшествующие τ_m месяцев.

Эмпирические уравнения регрессии (1) и (2) определяются на основе конечного числа статистических данных, и коэффициенты уравнения регрессии являются случайными величинами [Любимцев и др., 2016; Колданов и др., 2023; Емелин, 2023]. Поэтому проведена проверка общего качества уравнения регрессии и проверка гипотез относительно коэффициентов линейного уравнения регрессии. Уравнения регрессии в целом (критерий Фишера) и коэффициенты регрессии (критерий Стьюдента) с вероятностью 99.9% статистически значимы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для получения нескольких независимых прогнозов приведем результаты прогнозов двух моделей вариаций космических лучей.

4.1. Модель прогноза в приближении однопараметрической корреляции

При проведении регрессионного анализа установлены коэффициенты регрессии и их ошибки линейной системы уравнений (2):

$$v(t) \pm \sigma(t) [\%] = -(1.42 \pm 0.14) - (0.078 \pm 0.002) R_z(t), \quad (3)$$

Стандартная ошибка $\sigma = 3.25\%$; показатель регрессионной статистики $R^2 = 0.701$, т. е. 70% объясняется одним фактором R_z , а 30% — неучтенными факторами.

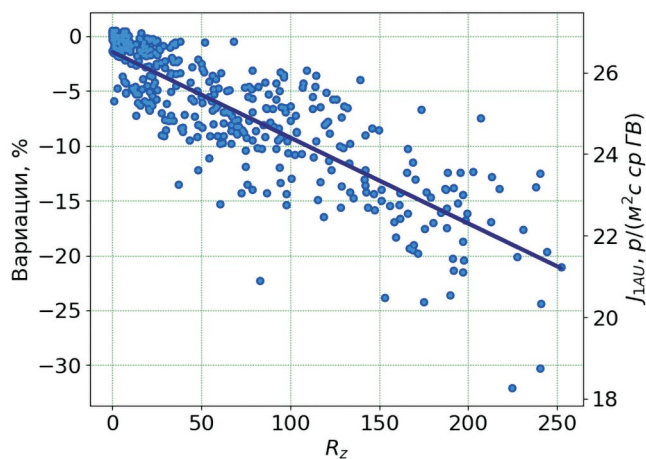


Рис. 4. Диаграмма рассеяния и линия регрессии системы линейных уравнений (2).

На рис. 4 приведена диаграмма рассеяния (левая шкала) для визуализации взаимосвязи числа солнечных пятен и вариаций космических лучей v . Вариации получены относительно базового периода 2009 года для частиц жесткостью 10 ГВ.

Для геофизических и астрофизических задач важно знать изменения интенсивности космических лучей J_{IAU} , которые связаны с вариациями космических лучей v на орбите Земли [Янке и др., 2023] как

$$J_{\text{IAU}} = J_{\text{LIS}} (1 + \Delta)(1 + v) = J_{\text{LIS}} (\Delta + 1)(1 + a_0 + a_1 \cdot R_z), \quad (4)$$

Здесь $J_{\text{LIS}} = 33.2 \text{ (м}^2 \text{ с ср ГВ)}^{-1}$ интенсивность 10 ГВ частиц на границе гелиосферы, $\Delta = -0.19$

остаточная модуляция галактических космических лучей в гелиосфере относительно базового периода, а a_k — коэффициенты регрессии. Полученная зависимость интенсивности от числа пятен R_z также приведена на рис. 4 (правая шкала).

4.2. Прогноз вариаций КЛ в приближении многофакторной модели

Приведем результаты для пятипараметрической модели, для которой при проведении регрессионного анализа установлены коэффициенты регрессии линейного уравнения (1) и их ошибки:

$$\begin{aligned} \nu(t) \pm \sigma = & (5.84 \pm 0.27) - (4.42 \pm 1.12) A_1 - \\ & - (0.053 \pm 0.003) CMEi - \\ & - (0.0044 \pm 0.0011) B_{pole} - \\ & - (0.112 \pm 0.005) \eta_{HCS} - (1.33 \pm 0.04) B_{ss}, [\%] \end{aligned} \tag{5}$$

Показатель регрессионной статистики $R^2 = 0.829$, т. е. только ~17% объясняется неучтенными факторами, стандартная ошибка $\sigma = 2.47\%$.

Следующий шаг — это проведение анализа корреляционной матрицы, определение набора значимых факторов (параметров) и их вклад в вариации космических лучей. Одним из ключевых допущений множественной линейной регрессии является то, что ни одна независимая переменная в модели не должна иметь сильной корреляции с другой. В нашем случае это условие в целом выполняется, но значения двух положительно коррелированных пар $\Gamma_{CMEi, \eta_{HCS}}$ и $\Gamma_{CMEi, B_{ss}}$ являются пограничными (~0.5). Анализ корреляционной матрицы (табл. 1) также показывает, что параметры A_1 и B_{pole} слабо связаны с вариациями ν , и их можно не включать в модель.

Вклад площади приэкваториальных корональных дыр A_1 в модуляцию обычно меньше вклада других параметров. Вклад полярного поля важен при сравнении циклов с разными полярностями, при прогнозировании одного цикла с одной полярностью ($A > 0$) и с ожидаемыми умеренными изменениями B_{pole} вклад этого параметра не может

быть большим. Учитывая это, параметры A_1 и B_{pole} можно не включать в модель. Это означает, что можно ограничиться трехпараметрической моделью; оценка показала, что максимальная ошибка при этом не превышает несколько процентов.

В соответствии с результатами проведенного корреляционного анализа уравнение регрессии для трехпараметрической модели запишется как

$$\begin{aligned} \nu(t) \pm \sigma = & (5.28 \pm 0.24) - \\ & - (0.054 \pm 0.003) CMEi - (0.114 \pm 0.005) \eta_{HCS} - \\ & - (1.26 \pm 0.04) B_{ss}, [\%]. \end{aligned} \tag{6}$$

Показатель регрессионной статистики $R^2 = 0.774$, т. е. только 23% объясняется неучтенными факторами, стандартная ошибка $\sigma = 2.91\%$.

Вклад каждого параметра в полную вариацию показан на рис. 5 (верхняя панель). Хорошо видны особенности вклада различных факторов в разных циклах при формировании вариаций космических лучей. В первую очередь это относится к среднему магнитному полю Солнца B_{ss} , и главная интрига заключается в дальнейшем поведении магнитного поля Солнца B_{ss} .

На рис. 5 (нижняя панель) проводится сравнение наблюдаемых и модельных значений вариаций для космических лучей с жесткостью 10 ГВ и их невязка. Вариации вычислены относительно базового периода 2009, который также указан на рисунке.

После 42 месяцев с начала 25-го цикла СА уже видно (см. рис. 2), что, по крайней мере, на фазе роста до середины 2023 г. число наблюдаемых чисел солнечных пятен выше прогнозируемых в работах [NASA/NOAA, 2019] и [Pesnell et al., 2018]. Возможно, это связано с простой, колоколообразной формой временной зависимости прогнозируемых параметров. Очевидно, что прогноз [Pesnell et al., 2018] в начале цикла более реалистичен, и 25-й цикл СА, видимо, будет активнее 24-го цикла. Насколько на данном этапе подтверждается прогноз 25-го солнечного цикла для таких параметров как $CMEi$, η_{HCS} , B_{ss} сказать нельзя из-за их поздней публикации в базах данных.

На рис. 6 показаны наблюдаемые вариации космических лучей вблизи орбиты Земли (серая заливка) и три варианта их прогноза. Первый прогноз на основе прогноза числа солнечных пятен из работы [NASA/NOAA, 2019] и однопараметрической модели, второй — на основе прогноза числа солнечных пятен из работы [Pesnell, 2018] и однопараметрической модели, третий — на основе прогноза многопараметрической модели вариаций. Хорошо между собой согласуются независимый первый и третий прогноз вариаций космических лучей.

Таблица 1. Корреляционная матрица многопараметрической модели

Фактор	A_1	$CMEi$	B_{pole}	η_{HCS}	B_{ss}	ν
A_1	1	-0.013	-0.025	0.193	-0.207	-0.009
$CMEi$		1	-0.088	0.559	0.436	-0.730
B_{pole}			1	-0.084	-0.273	+0.147
η_{HCS}				1	0.145	-0.609
B_{ss}					1	-0.670
ν						1

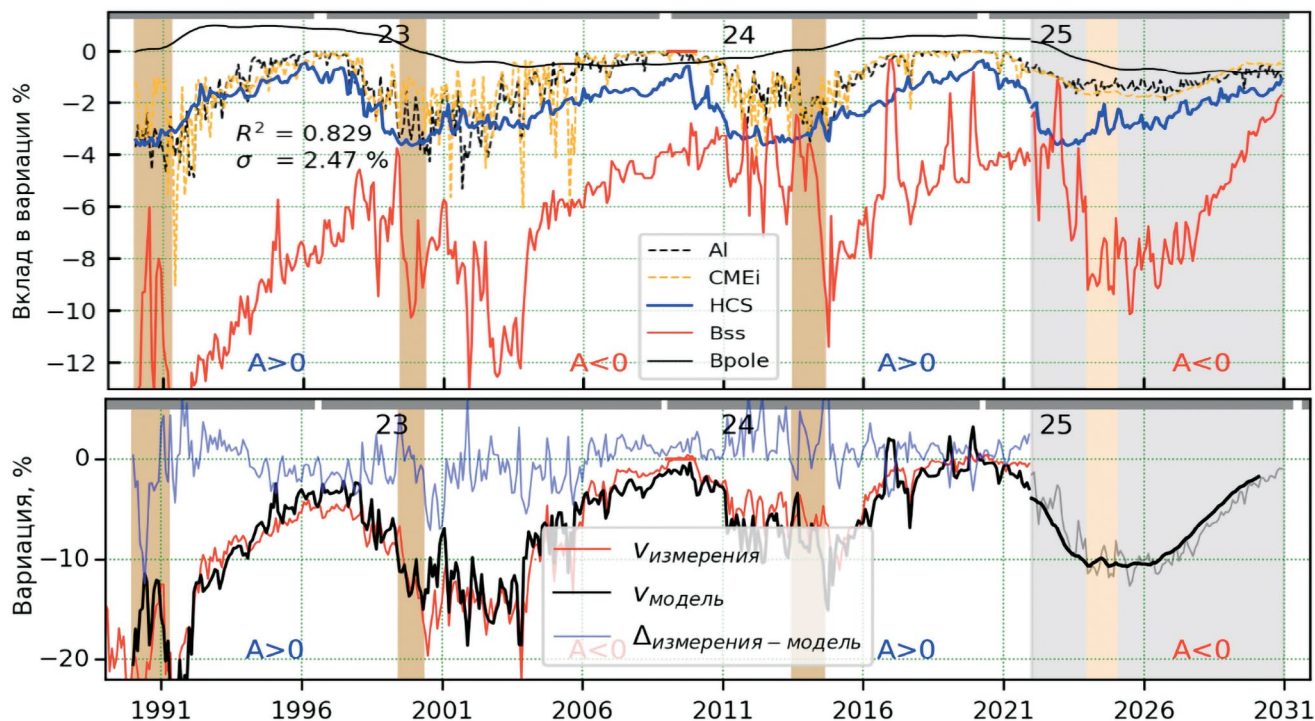


Рис. 5. Вклад в вариацию космических лучей различных параметров солнечной активности многопараметрической модели вариаций (верхняя панель) и долговременной ход наблюдаемой и моделируемой вариации и их невязка (нижняя панель). В левой части каждой панели показаны вычисленные величины, в правой части — прогнозируемые величины вклада различных факторов для 25-го цикла СА (серая заливка).

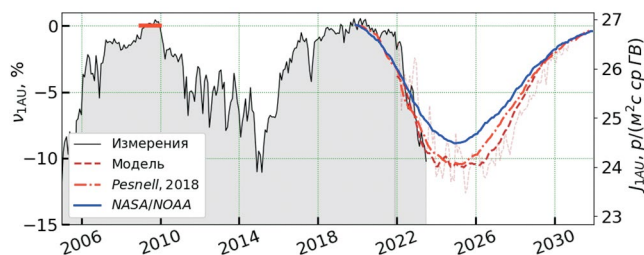


Рис. 6. Сравнение наблюдаемых до июля 2023 г. вариаций галактических космических лучей и прогнозируемых разными моделями вариаций для 25-го цикла СА. На правой шкале даны интенсивности галактических КЛ для различных фаз СА.

Для всех прогнозов наблюдаются некоторые расхождения с измеренными вариациями для 2021—2022 гг. В этот период наблюдается плоский ход вариаций космических лучей, затем — резкий спад. Расхождения, в первую очередь, связаны с неожиданно быстрым развитием СА в начале цикла и с особенностями вариаций КЛ в четных и нечетных циклах (с плоским и острым максимумами плотности КЛ).

5. ДОСТУПНОСТЬ ДАННЫХ АНАЛИЗА

Для 25-го цикла СА результаты в виде цифровых и графических данных прогноза гелиосферных

параметров B_{pole} , B_{ss} , η_{HCS} , $CMEi$, A_1 , ожидаемых вариаций и потока космических лучей для всех рассматриваемых моделей можно найти на ресурсе Google Disk (<https://drive.google.com/drive/folders/1aWwreGwacDIp345WIpGPZUSLyOVqFCT?usp=sharing>), папка “Forecast_25SA”.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Минимум 23/24 циклов СА был уникальным. В этот период наблюдалась минимальная величина магнитного поля на Солнце и в солнечном ветре [Cliver et al., 2011; 2017]. Необычность ситуации в текущем минимуме 24/25 (2019) заключается в том, что в то время как на низких и высоких энергиях по данным сети нейтронных мониторов уровень предыдущего минимума 23/24 (2009 г.) уже превышен, на промежуточных энергиях интенсивность пока несколько ниже этого уровня. Такая же картина наблюдается по данным КА и стратосферного зондирования в Мурманске, Москве, Антарктиде [Kravinev et al., 2021].

Мы выполнили прогноз вариаций космических лучей на 25-й цикл солнечной активности двумя независимыми методами. Первый базировался на прогнозе числа солнечных пятен и однопараметрической модели модуляции космических лучей,

Таблица 2. Наблюдаемые и прогнозируемые вариации и интенсивности галактических космических лучей в экстремальных точках 24-го и 25-го циклах СА

Экстремальные точки	max 23	min CA 23/24	max 24	min CA 24/25	max 25	min CA 25/26
Период, год.месяц	2001.12	2009.01	2014.05	2019.12	2025.04 ± 1.0	2031 ± 3.0
Вариация, %	–19.5	0	–11.2	0 ± 0.15	–10	~0
J_{LAW} ($m^2 c sr GB$) ^{–1}	21.6	26.8 ± 1.0	23.98	26.8 ± 1.3	24.2 ± 2.0	~26.8

второй — на прогнозе ряда параметров (среднее магнитное поле Солнца, наклон токового слоя, СМЕ-индекс) многопараметрической модели вариаций космических лучей. По данным о вариациях получен прогноз вариаций и потока космических лучей жесткостью 10 ГВ на орбите Земли.

После более чем 3 лет с начала 25-го цикла СА уже видно (рис. 2), что, по крайней мере, на фазе роста число наблюдаемых чисел солнечных пятен выше прогнозируемых в работах [NASA/NOAA, 2019] и [Pesnell et al., 2018].

Вероятно, что прогноз [Pesnell et al., 2018] более реалистичен, и 25-й цикл СА будет незначительно активнее 24-го цикла.

Два независимых результата прогнозов параметров, полученные на основе эмпирической и ARIMA моделей, хорошо согласуются, что подтверждает рис. 3.

Пока еще (после только 3 лет с начала цикла) рано судить, насколько подтверждается сделанный нами прогноз на 25-й цикл параметров A_p , $CMEi$, B_{pole} , η_{HCS} , B_{ss} .

Поскольку точность модели вариаций космических лучей достаточно высокая, то точность прогноза вариаций космических лучей в основном определяется точностью прогноза параметров солнечной активности.

Для ретро и прогнозируемого периода определены вариации галактических КЛ на 1 АУ за пределами магнитосферы в экстремальных точках 24 и 25-го циклов СА. Вычисления интенсивностей выполнены на основе выражения (4) и сведены в табл. 2. Этот результат отражен на рис. 6 (правая шкала).

Флюенсы частиц жесткостей >10 ГВ для среднегодовых интервалов для минимума и максимума СА равны $5 \cdot 10^6$ и $4.6 \cdot 10^6$ ($cm^2/год$)^{–1} соответственно.

С точки зрения космической погоды наиболее важным результатом является то, что установленные эмпирические соотношения обеспечивают возможность прогнозирования потока космических лучей на орбите Земли на период 25-го цикла солнечной активности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективам Мировой сети станций космических лучей (http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/Our_Acknowledgment.pdf) и NMDB-проекта (www.nmdb.eu). Работа проводится в рамках УНУ “Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)” (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/433536>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН.

ORCID iDs

Янке В. Г. (<https://orcid.org/0000-0001-7098-9094>)
Белов А. В. (<https://orcid.org/0000-0002-1834-3285>)
Гущина Р. Т. (<https://orcid.org/0000-0002-5247-7404>)
Кобелев П. Г. (<https://orcid.org/0000-0002-9727-4395>)
Трефилова Л. А. (<https://orcid.org/0000-0002-2563-5550>)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А. В., Гущина Р. Т., Обридко В. Н., Шельтинг Б. Д., Янке В. Г. Прогноз и эпигноз долгопериодных вариаций космических лучей на основе различных индексов солнечной активности // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 6. С. 890—892.
- Белов А. В., Гущина Р. Т. Индекс долговременного влияния спорадической солнечной активности на модуляцию космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 1. С. 3—10. <https://doi.org/10.7868/S0016794018010030>
- Белов А. В., Гущина Р. Т., Янке В. Г. Вариации космических лучей в 23—24 циклах солнечной активности по данным мировой сети станций космических лучей // Тр. конф. “Астрономия-2018”. ГАИШ МГУ. 22—26 октября 2018. 2018. Т. 2. С. 27—30. <https://doi.org/10.31361/eaas.2018-2.006>
- Гущина Р. Т., Белов А. В., Янке В. Г. Спектр долгопериодных вариаций в минимуме солнечной

- активности 2009 // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 577—580.
<https://doi.org/10.7868/S0367676513050244>
- Гущина Р.Т., Белов А.В., Тлатов А.Г., Янке В.Г.* Корональные дыры в долговременной модуляции космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 3 С. 275—282.
<https://doi.org/10.7868/S0016794016030068>
- Дорман Л.И.* Вариации космических лучей и исследование космоса М.: Изд-во РАН СССР, 1963. 1027 с.
- Емелин А.* Справочник. 2023.
<http://mathprofi.net>
- Ишков В.И.* Текущий 25 цикл солнечной активности: начальный этап // Физика плазмы в солнечной системе. 2022.
- Ишков В.И.* Итоги и уроки 24 цикла — первого цикла второй эпохи пониженной солнечной активности // Астрон. журн. 2022. Т. 99. № 1. С. 54—69.
<https://doi.org/10.31857/S0004629922020050>
- Колданов А.П., Колданов П.А.* Теория вероятностей и математическая статистика. Изд. дом ВШЭ, 2023. 248 с.
<https://doi.org/10.17323/978-5-7598-2544-9>
- Крымский Г.Ф.* Дифференциальный механизм суточной вариации космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 1964. Т. 4. № 6. С. 977—986.
- Крымский Г.Ф., Кузьмин А.И., Кривошапкин П.А.* Космические лучи и солнечный ветер. Новосибирск: Наука, 1981. 224 с.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Герасимова С.К., Григорьев В.Г., Мамрукова В.П.* Модуляция космических лучей гелиосферным нейтральным слоем // Геомагнетизм и аэрономия. 2001. Т. 41. № 4. С. 444—449.
- Любимцев О.В., Любимцева О.Л.* Линейные регрессионные модели в эконометрике. 2016.
https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/economic_statistics/859984.pdf
- Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.* О долговременной модуляции космических лучей в 23—24 циклах солнечной активности // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 9. С. 1354—1357.
<https://doi.org/10.31857/S0367676521090350>
- Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.* Вариации космических лучей разной энергии в минимумах циклов солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. Т. 62. № 4. С. 426—435.
<https://doi.org/10.31857/s0016794022040174>
- Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т., Кобелев П.Г., Трефилова Л.А.* Об остаточной модуляции галактических космических лучей в гелиосфере // Космич. исслед. 2023. Т. 61. № 1. С. 43—51.
<https://doi.org/10.31857/S0023420622060115>
- Bajaj A.* Time Series Prediction: How is it different from other machine learning?
<https://neptune.ai/blog/time-series-prediction-vs-machine-learning>. 2023.
- Cliver E.W., Ling A.G.* The Floor in the Solar Wind Magnetic Field Revisited // Sol. Phys. 2011. V. 274. P. 285—301.
<https://doi.org/10.1007/s11207-010-9657-6>
- Cliver E.W., von Steiger R.* Minimal Magnetic States of the Sun and the Solar Wind: Implications for the Origin of the Slow Solar Wind // Space Sci. Rev. 2017. V. 210. P. 227—247.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0224-1>
- Hathaway D.H.* The Solar Cycle // Living Rev. Sol. Phys. 2015. V. 12. Article number 4.
<https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- Krainev M.B., Gvozdevsky B.B., Kalinin M.S., Aslam O.P.M., Ngoben M.D., Potgieter M.S.* On the solar poloidal magnetic field as one of the main factors for maximum GCR intensity for the last five sunspot minima // Proc. 37th ICRC. Berlin, Germany, July 12—23, 2021. PoS(ICRC2021)1322. 2021.
- Labonville F., Charbonneau P., Lemerle A.* A dynamo-based forecast of solar cycle 25. // Sol. Phys. 2019. V. 294. Article № 82.
<https://doi.org/10.1007/s11207-019-1480-0>
- Li F., Kong D., Xie J., Xiang N., Xu J.* Solar cycle characteristics and their application in the prediction of cycle 25 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 181 P. 110—115.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.10.014>
- Martucci M., Munini R., Boezio M., et al.* Proton Fluxes Measured by the PAMELA Experiment from the Minimum to the Maximum Solar Activity for Solar Cycle 24 // The Astrophysical Journal Letters. 2018. V. 854. L2. № 1.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa9b2>
- Miao J., Wang X., Ren T., Li Z.* Prediction verification of solar cycles 18—24 and a preliminary prediction of the maximum amplitude of solar cycle 25 based on the Precursor Method // RAA, 2020. V. 20. № 1. Article № 004.
<https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/1/4>
- Nandy D.* Progress in solar cycle predictions: Sunspot cycles 24—25 in perspective // Sol. Phys. 2021. V. 296. Article ID 54.
<https://doi.org/10.1007/s11207-021-01797-2>
- NASA/NOAA Predicted-sunspot-number-and-radio-flux* // Space weather prediction center. 2019.
<https://www.spaceweatherlive.com/ru/solnechnaya-aktivnost/solnechnyy-cikl.html>
<https://www.swpc.noaa.gov/products>
- Obridko V.N., Shelting B.D.* Structure of the heliospheric current sheet as considered over a long time interval (1915—1996) // Solar Phys. 1999. V. 184. № 1. P. 187—200.
<https://doi.org/10.1023/A:1005041329043>
- Parker E.N.* Cosmic ray modulation by solar wind // Physical Reviews. 1958. V. 110. P. 1445.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.110.1445>
- Parker E.N.* Interplanetary dynamical processes. New York: Interscience Publishers, 1963. 272 p.

- Parker E.N.* The passage of energetic charged particles through interplanetary space // *Planetary and Space Sciences*. 1965. V. 13. P. 9—49.
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(65\)90131-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(65)90131-5)
- Pesnell W.D.* Solar Cycle Predictions (Invited Review) // *Solar Phys.* 2012. V. 281. P. 507—532.
<https://doi.org/10.1007/s11207-012-9997-5>
- Pesnell W.D., Schatten K.H.* An Early Prediction of the Amplitude of Solar Cycle 25 // *Sol. Phys.* 2018. V. 293. Article № 112.
<https://doi.org/10.1007/s11207-018-1330-5>
- Petrovay K.* Solar cycle prediction // *Living Rev. Sol. Phys.* 2020. V.17. Article № 2.
<https://doi.org/10.1007/s41116-020-0022-z>
- Rankin J.S., Bindi V., Bykov A.M., Cummings A.C., Torre S.D., Florinski V., Heber B., Potgieter M.S., Stone E.C., Zhang M.* Galactic Cosmic Rays Throughout the Heliosphere and in the Very Local Interstellar Medium // *Space Science Reviews*. 2022. V. 218. Article № 42.
<https://doi.org/10.1007/s11214-022-00912-4>
- Rob J.H., Athanasopoulos G.* Forecasting: principles and practice. Australia: Monash University, 2014.
<https://otexts.com/fpp2>
- Sarp V., Kilcik A., Yurchyshyn V., Rozelot J., Ozguc A.* Prediction of Solar Cycle 25: a non-linear approach // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 2018. V. 481. № 3. P. 2981—2985.
<https://doi.org/10.1093/mnras/sty2470>
- Shi X., Fu H., Zhenghua Huang Z., et al.* The Solar Cycle Dependence of In Situ Properties of Two Types of Interplanetary CMEs during 1999—2020 // *The Astrophysical Journal*. 2022. V. 940. Article № 103.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac9b20>

Forecast of Modulation of Cosmic Rays with Rigidity of 10 GV in the 25th Solar Activity Cycle

V. G. Yanke^{1, *}, A. V. Belov¹, R. T. Gushchina¹, P. G. Kobelev^{1, **}, L. A. Trefilova¹

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Moscow, Troitsk, Russia

*e-mail: yanke@izmiran.ru

**e-mail: kobelev@izmiran.ru

Based on a forecast of solar activity parameters and the model developed by the authors for modulation of Galactic cosmic rays, we forecasted cosmic ray variations in the 25th solar activity cycle. The cosmic ray flux forecast is based on correlation with the number of sunspots (single-parameter model) or with a set of solar (mainly magnetic) parameters (multiparameter model). The forecast for the number of sunspots was taken from published data; the forecast for other solar parameters was done in the study. It is shown that variations in cosmic rays over three years of the current 25th cycle, in general, do not contradict the forecasts and indicate that the 25th solar activity cycle is expected to be slightly more active compared to the 24th.