

УДК 524.1

ПРОГНОЗ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ТЕКУЩЕЕ СТОЛЕТИЕ

© 2025 г. П. Г. Кобелев^{1,*}, Л. А. Трефилова¹, А. В. Белов¹, Р. Т. Гущина¹, В. Г. Янке¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкина РАН (ИЗМИРАН),

Москва, Троицк, Россия

*e-mail:kobellev@izmiran.ru

Поступила в редакцию 13.07.2024 г.

После доработки 17.09.2024 г.

Принята к публикации 26.09.2024 г.

Для диагностики и прогноза состояния гелиосферы, а также космической погоды и климата необходимы знания о временных изменениях потока галактических космических лучей на орбите Земли. Целью работы является прогнозирование потока космических лучей на ближайшее столетие, основываясь на связи модуляции галактических космических лучей с характеристиками солнечной активности. Для долговременного прогноза были использованы модели одного параметра солнечной активности, определяющего модуляцию галактических космических лучей – числа солнечных пятен либо потенциала солнечной модуляции космических лучей. В результате, на основе анализа десятка моделей поведения солнечной активности на ближайшее столетие, был получен долговременный прогноз потока космических лучей. Проведенный анализ позволяет предположить, что вопреки более ранним прогнозам вероятность большого солнечного минимума в конце 21 века невелика. Это показывают большинство опубликованных различными авторами и проанализированных нами долговременных прогнозов солнечной активности. Ожидается почти двукратное повышение уровня солнечной активности к середине века и последующий переход приблизительно к современному уровню в конце века. На орбите Земли к середине века ожидается пониженная интенсивность галактических космических лучей.

Ключевые слова: солнечная активность, число солнечных пятен, прогноз, модуляция, интенсивность галактических космических лучей

DOI: 10.31857/S0016794025020032, **EDN:** CWRVER

1. ВВЕДЕНИЕ

Галактические космические лучи (КЛ) воздействуют на атмосферу Земли, оказывая существенное влияние не только на космическую погоду, но и на земной климат [Mörner, 2015; Vinos, 2022]. Для понимания будущего развития климата Земли необходимы долговременные и точные прогнозы солнечных циклов и полученные на их основе прогнозы потока галактических КЛ. Прогнозирование в основном проводится только для ближайшего солнечного цикла. Изменение солнечной активности в масштабе одного цикла является актуальной задачей и имеет как научный (поскольку понимание солнечной активности определяет точность ее прогноза), так и практический интерес (для долгосрочного планирования деятельности в космосе).

Изменение солнечной активности в долговременном масштабе приводит к фундаментальным последствиям для климата Земли и для всей жизни на Земле [Gray et al., 2010; Vinos, 2022; Херападеас А., 2024]. Поэтому понимание изменений солнечной активности в прошлом, настоящем и будущем находится в центре внимания многих исследований, являясь актуальной задачей.

Рассматривается ряд механизмов солнечного воздействия на климат Земли. Наиболее очевидный механизм солнечного воздействия связан с изменением нагрева атмосферы Земли, происходящего из-за изменения полного потока солнечной радиации по всему спектру. По данным прямых измерений, изменения, наблюдаемые в течение солнечного цикла, составляют

всего 1 Вт/м², и за последние 9000 лет они практически не менялись [Gulev et al., 2023].

Другой механизм влияния Солнца на климат Земли включает в себя прямое воздействие наблюдавшихся изменений солнечного ультрафиолетового излучения на стратосферный озон, с соответствующими изменениями температуры из-за возникновения градиентов температуры и ветра.

Солнечная модуляция галактических КЛ также рассматривается в качестве механизма влияния солнечной активности на климат Земли через способность потока КЛ влиять на облачный покров Земли. Ионизация воздуха вторичными КЛ приводит к возникновению многих атмосферных процессов. Это образование облачности [Palle et al., 2004; Vinos, 2022] и осадков [Kniveton, 2004], формирование аэрозолей как центров конденсации [Лушников, 2014], процессы эволюции барических систем в нижней атмосфере [Веретененко и др., 2012; Янчуковский, 2024] и возникновения или развития циклонической циркуляции [Tinsley, 2012], а также изменения прозрачности атмосферы [Кудрявцев и др., 2011] и параметров глобальной электрической цепи [Tinsley et al., 2006; Tinsley, 2012]. Вклад модулированного потока КЛ в ионизацию тропосферы непрерывен. Это указывает, что ионизация атмосферы КЛ является одним из звеньев солнечно-атмосферных связей.

Долгосрочные тенденции солнечной активности активно рассматривались другими исследователями. До последнего десятилетия существовало несколько прогнозов долгосрочной солнечной активности [например, Бонев и др., 2004 г.; Abgeu et al., 2010; Барнард и др., 2011; Локвуд, 2010; Локвуд и др., 2011; Usoskin, 2017; Biswas et al., 2023]. Все эти исследования в основном базируются на инструментальном ряде числа солнечных пятен длиной 400 лет, реже на восстановленном ряде тысячелетней солнечной активности, полученным из космогенных радионуклидов (¹⁰Be и ¹⁴C) [Knudsen et al., 2009].

Мы в обсуждаемой работе выделили только те долговременные прогнозы солнечной активности, которые опирались на наблюдаемом 400-летнем ряде числа солнечных пятен и на 9400-летнем ряде индексов солнечной активности, восстановленных по данным космогенных радионуклидов. Такие работы в основном были выполнены за последнее десятилетие.

Целью работы является долговременный прогноз потока КЛ на ближайшее столетие на основании имеющихся данных о связи модуляции галактических КЛ с прогнозируемой солнечной активностью. Задачи: 1) провести анализ опубли-

кованных долговременных прогнозов числа солнечных пятен и потенциала солнечной модуляции КЛ на текущее столетие; 2) построить парную модель вариаций КЛ как функцию числа солнечных пятен, а также использовать приближение силового поля для связи потенциала и потока КЛ; 3) для различных сценариев прогноза солнечной активности выполнить прогноз интенсивности галактических КЛ на ближайшую сотню лет.

Научная новизна заключается в критическом обзоре имеющихся прогнозов индекса солнечной активности на ближайшее столетие и потенциала солнечной модуляции КЛ и проведение на их основе по единой методике оценки потоков КЛ с позиции применения для прогноза климата Земли.

2. ДАННЫЕ ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

При прогнозировании солнечной активности на сотни лет необходимо привлекать тысячелетние данные прошлых эпох. В настоящее время единственным способом получить такой длинный ряд данных солнечной активности является метод космогенных изотопов, базирующийся на природных архивах содержания углерода в годичных кольцах деревьев или бериллия в ледяных кернах. В результате калибровки содержания радионуклидов формируется ряд числа солнечных пятен или потенциала солнечной КЛ.

Солнечные циклы различаются по продолжительности, форме и амплитуде, а также периодически входят в периоды почти неактивного состояния, называемые большими минимумами солнечной активности. Но эти характеристики циклов не могут быть получены по данным космогенных изотопов, поскольку возможности датировки содержания радионуклидов ограничены временным разрешением в ~10 лет и только с 1510 года – однолетним [Stuiver et al., 1998]. Все данные прогноза солнечной активности приводятся для средних значений либо для 11- или 22-летних сглаженных значений.

Прогнозы солнечной активности на XXI век, полученные различными методами, приведены в табл. 1. Наиболее часто используется спектральная информация, содержащаяся в прошлой солнечной активности. Некоторые авторы привлекают модель, базирующуюся на теории возмущения солнечного динамо, основанную на взаимодействии планет с Солнцем. Популярна также модель суперпозиции наблюдаемых низкочастотных периодичностей (11, 22, 53 года, модулированных 88-летним циклом Глейсберга, 208-летним ци-

клом де Бриса или даже 2300-летним циклом Холлстатта). Ниже в табл. 1 приведен список привлекаемых данных и методы прогноза. Для всех прогнозов, перечисленных в табл. 1, графический

материал можно найти в папке “Forecast_2100” на ресурсе Yandex Disk (<https://disk.yandex.ru/d/mKHM2dztqNoHw>), папка Forecast_2100. Ниже приведем результаты прогнозов как числа

Таблица 1. Список используемых работ прогноза числа солнечных пятен R_z или потенциала ϕ солнечной модуляции космических лучей

Метод прогноза и прогнозируемая СА вблизи 2100 года (~31 цикл)	
	Индекс солнечной активности – число солнечных пятен R_z (рис. 1)
1	Прогноз солнечной активности был смоделирован как низкочастотный гармонический осциллятор (периоды 22, 53, 88, 106, 208 и 420 лет). К середине текущего столетия прогнозируется солнечная активность ~200, сразу после 2100 года – более низкая, близкая к дальтоновскому минимуму [Clilverd et al., 2006]
2	На основе авторегрессионной модели (моделирование вынужденных и затухающих гармонических осцилляторов от предыдущих 22-х циклов) сделан прогноз будущих 15-ти циклов до 2175 года. Для 31-го цикла СА (2087–2098 годы) прогнозируется низкая солнечная активность ~60 [Hiremath, 2008]
3	Эпигноз в результате спектрального анализа временных рядов среднего числа солнечных пятен за 10 лет и 1000-летний прогноз солнечной активности. Для текущего столетия прогнозируется умеренная СА ~120, для конца столетия – очень низкая солнечная активность ~25 [Rigozo et al., 2010]
4	Модель базируется на теории возмущения солнечного динамо, основанной на взаимодействии планет с Солнцем и представляющая собой четыре взаимодействующие частоты (орбитальные параметры планет 22.14, 19.528, 19.858, 21.005 лет), модулированные волнами 178.8 и 1253 лет. Модель предсказывает, что Солнце входит в грандиозный минимум, и этот минимум может сохраняться в течение длительного периода времени: низкая солнечная активность на протяжении всего столетия: максимальная ~80 и очень низкая СА ~40 к 2100 году [Salvador, 2013]
5	Прогноз до 3500 года, базирующийся на модели динамо; случайность и нелинейность возникновения биполярных магнитных областей в модели приводят к изменчивым магнитным циклам. Прогноз удовлетворительно согласуется с более поздними прогнозами, например, [Herrera et al., 2021] за исключением начала нынешнего столетия [Karak et al., 2017]
6	Эпигноз и прогноз с применением алгоритмов и анализа машинного обучения к временным рядам солнечных пятен (1700–2019 гг.). Для текущего столетия прогнозируется достаточно высокая СА, около 200, которая не снижается к 2100 году [Herrera et al., 2021]
7	Прогнозы от метода ARIMA до современных подходов долгой краткосрочной памяти (LSTM) с различной архитектурой нейронных сетей. Для текущего столетия прогнозируется высокая СА с некоторым снижением к 31-му циклу СА [Nasirpour et al., 2021]
8	Прогноз методом спектрального анализа временных рядов среднего числа солнечных пятен для пяти различных частотных рядов. К середине текущего столетия прогнозируется солнечная активность ~200, с тенденцией снижения к концу и после 2100 года (Vinos, 2022; https://judithcurry.com/2023/07/04/solar-activity-solar-cycle-25-surpasses-cycle-24)
9	Для текущего столетия прогнозируется достаточно низкая СА около ~100 [Barnard et al., 2011]
Индекс солнечной активности – потенциал ϕ солнечной модуляции КЛ (рис. 2)	
1	Прогнозирование потенциала солнечной модуляции космических лучей для периода 2000–2080 методом полиномиального экстраполирования. К концу столетия прогнозируется умеренное значение потенциала солнечной модуляции космических лучей ~400 MV, близкое к современному значению [Barnard et al., 2011]
2	Прогнозирование потенциала солнечной модуляции космических лучей для периода 2000–2500 годы методами Фурье анализ и вейвлет разложения. К концу ~2100 года прогнозируется достаточно низкое значение потенциала солнечной модуляции космических лучей ~ 200 MV и ниже [Steinheilber et al., 2013]

солнечных пятен, так и потенциала солнечной модуляции КЛ на ближайшие 100 лет.

3. ПРОГНОЗЫ ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Число солнечных пятен – это наиболее легко наблюдаемый индикатор уровня солнечной активности и источник наиболее длительно регистрируемого ряда данных об истории активности Солнца.

Для оценок в работе анализировались девять долговременных прогнозов солнечной активности, для которых удалось получить данные в цифровом виде. В приведенных работах, наряду с продолжительностью солнечного цикла, прогнозировались или максимальное число солнечных пятен в цикле [Clilverd et al., 2006; Hiremath, 2008; Salvador, 2013; Barnard et al., 2011; Karak et al., 2017] или максимальное и минимальное число пятен [Nasirpour et al., 2021; Herrera et al., 2021; Vinos, 2022], реже – среднее число пятен в цикле [Rigozo et al., 2010]. После приведения всех данных к одному масштабу, все прогнозы и краткое описание методов прогноза сведены в табл. 1, а графическое сравнение проведено на рис. 1 (верхняя панель). Для прогноза числа солнечных пятен [Barnard et al., 2011] приведен также коридор ошибок. Ошибки прогноза

велики, например, для крайне правого момента времени 2080 года $R_z = 84 \pm 76$, т.е. около 100%.

Можно выделить 3 прогноза [Herrera et al., 2021; Nasirpour et al., 2021; Vinos, 2022], выполненных в последние несколько лет. У них близкий временной ход, кроме того, в работах [Nasirpour et al., 2021; Vinos, 2022] достаточно точно прогнозируется максимум 25 цикла солнечной активности. В дальнейшем будем использовать только эти прогнозы (отдельно они показаны на нижней панели рис. 1). Из рисунка видно, что принятые нами прогнозы в начальный момент согласуются по фазе, но потом к концу столетия прогноз [Vinos, 2022] постепенно уходит по фазе примерно на 4 года. Этот уход связан с трудно прогнозируемой длительностью солнечного цикла.

4. ПРОГНОЗЫ ПОТЕНЦИАЛА СОЛНЕЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Публикуются прогнозы и других индексов солнечной активности, например, потенциала солнечной модуляции КЛ, однако, этот индекс имеет смысл исключительно только по отношению к потокам КЛ в гелиосфере и прямое сравнение такого прогноза с прогнозом числа солнечных пятен невозможно. Восстановление интенсивности КЛ выполняется на основе модели силового поля (раздел 6).

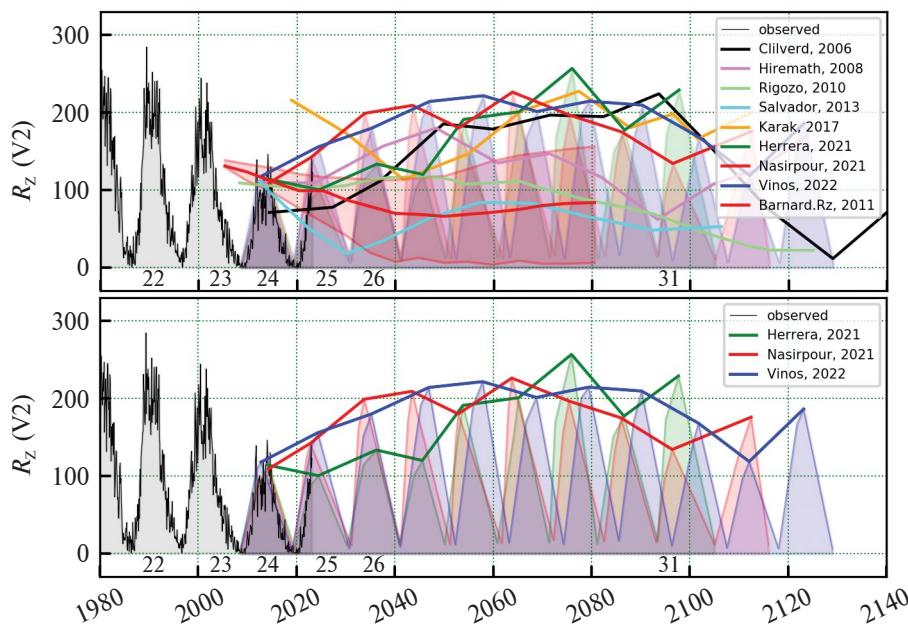


Рис. 1. Долгосрочные прогнозы числа солнечных пятен R_z согласно табл. 1. Непрерывной линией соединены максимумы числа солнечных пятен для каждого прогноза. Для прогноза [Barnard et al., 2011] приведен также коридор ошибок. На верхней панели показаны все имеющиеся 9 прогнозов, на нижней панели – 3 выделенных прогноза.

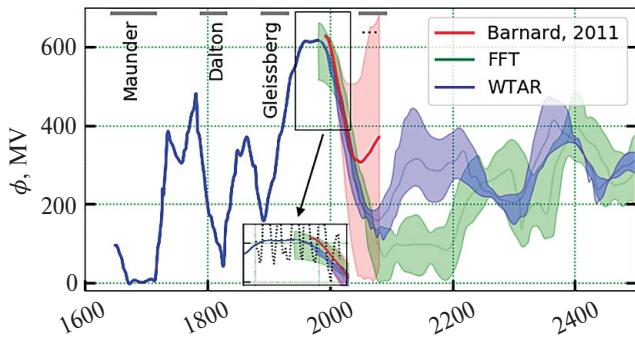


Рис. 2. Реконструированный до ~ 2000 года и прогнозируемый потенциал ϕ солнечной модуляции космических лучей для двух моделей прогноза (FFT и WTAR) на период 2000–2500 годы (22-летнее сглаживание) [Steinhilber et al., 2013] и прогноз потенциала из работы [Barnard et al., 2011]. Вставкой показаны среднегодовые значения потенциала солнечной модуляции КЛ по данным наземной сети нейтронных мониторов [Usoskin et al., 2017].

Мы рассмотрели два прогноза потенциала солнечной модуляции КЛ, которые базировались на 9300-летней записи 25-летних средних значений солнечного модуляционного потенциала [Steinhilber et al., 2008] по данным космогенных изотопов и нейтронных мониторов, но выполненные по разной методике (см. табл. 1).

Первый прогноз потенциала солнечной модуляции КЛ для периода 2000–2080 гг. был выполнен в работе [Barnard et al., 2011] методом полиномиального экстраполирования (рис. 2). Коридор ошибок, например, для крайне правого момента времени $\phi = 370 \pm 320$ МВ, т.е. около 100%.

Другой прогноз потенциала солнечной модуляции КЛ для периода 2000–2500 гг. был выполнен в работе [Steinhilber et al., 2013] двумя методами: методом Фурье анализа (FFT) и методом вейвлет разложения в сочетании с моделью автoregressии (WTAR) данных потенциала солнечной модуляции КЛ в прошлом. Результат прогноза потенциала солнечной модуляции КЛ приведен на рис. 2. Оба метода к концу ХХI века предсказывают минимум солнечной активности, который будет сопоставим с дальтоновским минимумом. Сразу отметим, что это не подтверждается прогнозами, приведенными выше на рис. 1. К сожалению, интересующий нас диапазон ХХI века получен с низким разрешением, и из представленных данных следует только быстрое снижение потенциала солнечной модуляции КЛ к концу текущего столетия. Прогнозы работ [Barnard et al., 2011] и [Steinhilber et al., 2013], выполненные на

одном экспериментальном материале [Steinhilber et al., 2008], но различными методами, согласуются между собою.

5. МОДЕЛЬ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Если прогноз солнечной активности выполнен для числа солнечных пятен, то для оценки ожидаемых вариаций КЛ необходимо: 1) по данным наземной сети детекторов КЛ получить ожидаемые вариации v КЛ в межпланетном пространстве (глобально-спектрографический метод – GSM) и 2) построить модель долговременных вариаций либо интенсивности потока КЛ как функцию числа солнечных пятен R_z (модель долговременных вариаций – LTV).

1) Оценка методом GSM ожидаемых в изотропном приближении в межпланетном пространстве вариаций КЛ v проведена по данным Мировой сети детекторов КЛ [Belov et al., 2018; Белов и др., 2018]. Если на магнитосферу и атмосферу падает спектр первичных частиц $J(R)$, то скорость счета N^i i -го наземного детектора определяется как

$$N^i = \int_{R_c^i}^{R_U} m(h_0^i, R) \cdot J(R) dR \quad (i \approx 1 \div 50),$$

где $m(h_0^i, R)$ – интегральная кратность генерации, т.е. число частиц определенного типа, которое образуется в атмосфере от одной первичной частицы и регистрируется детектором, R_c^i – жесткость геомагнитного обрезания. Варьируя последнее выражение и переходя к относительным величинам, получим

$$\begin{aligned} \frac{\delta N^i}{N^i} &= \int_{R_c^i}^{R_U} \frac{m(h_0^i, R) J}{N^i} \cdot \frac{\partial J}{J}(R) \cdot dR = \\ &= \int_{R_c^i}^{R_U} W^i(R_c^i, h_0^i, R) \cdot \frac{\partial J}{J}(R) \cdot dR, \end{aligned}$$

где $W^i(R_c^i, h_0^i, R)$ функции связи (определяются экспериментально или расчетным путем), $\delta J/J$ – спектр вариаций первичных КЛ (протоны, ядра).

Эффективные жесткости частиц детекторов (стратосферного зондирования, нейтронных мониторов и мюонных телескопов) от ~ 0.5 ГВ до 70 ГВ, что позволяет исследовать энергетические характеристики вариаций. Окончательно, наблюдаемые вторичные вариации v^i связаны со спектром первичных вариаций $\delta J/J$ КЛ системой интегральных уравнений Фредгольма I-го рода:

$$v^i = \int_{R_c^i}^{R_U} W^i(R_c^i, h_0^i, R) \frac{\partial J}{J}(R) dR,$$

где в качестве ядра интегрального уравнения выступает функция связи $W^i(R_c, h_0^i, R)$, а в качестве неизвестной функции – спектр вариаций $\delta J/J$, т.е. энергетическая зависимость вариаций КЛ.

В нашем случае важным обстоятельством является то, что искомый спектр вариаций $v = \delta J/J$ можно искать в виде аналитической функции с некоторым числом параметров. Мы рассматривали трехпараметрический спектр $\delta J/J = a \cdot (R_0 + R)^{-\gamma}$. Для долговременных вариаций $\gamma = 1/2$ и меняется с СА, R_0 зависит от полярности магнитного поля Солнца, a – амплитуда спектра вариаций, которая показана на рис. 1.

2) Найденный спектр вариаций используется для построения простейшей однопараметрической модели LTV, т.е. модели линейной парной корреляции между вариациями КЛ $v(R)$ в гелиосфере и числом солнечных пятен R_z :

$$v^i = a_0 + a_1 \cdot R_z^i \pm \sigma^i, \quad (1)$$

решение которой для периода 1985–2023 годов

$$v_{model} = -(1.56 \pm 0.30) - (0.078 \pm 0.001) R_z [\%].$$

На рис. 3 проводится сравнение наблюдаемых и модельных значений вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ и их невязка. Вариации вычислены относительно базового периода 2009 года, который также указан на рисунке. Для такой простой модели невязка составляет несколько процентов, однако в отдельные периоды она может быть существенно больше.

Для рассмотренной модели коэффициент множественной детерминации $R^2 = 0.709$, т.е. 71% объясняется учтенными факторами; стандартная ошибка модели $\sigma = 3.21\%$; число обусловленности, как показатель устойчивости решения систе-

мы, равен $cond = 143$, т.е. система достаточно хорошо обусловлена и при возмущении правой части уравнения (1) на δX , левая часть изменится не более $\delta Y = cond \delta X$.

Для прикладных задач важно знать изменения интенсивности КЛ J на орбите Земли за пределами магнитосферы, которые связаны с найденными вариациями КЛ v . Для такого перехода проведена калибровка детектора “сеть NM” для базового периода 2009 г. по данным PAMELA (“Нагрузка по исследованию antimатерии и астрофизики лёгких ядер”) [Янке и др. 2023]. По определению $v = J/J_{2009} - 1$, откуда интенсивность на орбите Земли равна $J = J_{2009}(v + 1)$ для интенсивности в базовый период $J_{2009} = J_{PAMELA} = 26.869 \text{ p}/(\text{m}^2 \text{ср ГВ})$ для 10 ГВ с ошибкой $\sim 4\%$.

Можно выполнить преобразование баз и перейти от базового уровня J_{2009} к уровню межзвездной интенсивности J_{LIS} : вариации интенсивности J_{2009} относительно интенсивности КЛ J_{LIS} на границе гелиосферы равны $\Delta_{2009} = J_{2009}/J_{LIS} - 1$. Откуда $J_{2009} = J_{LIS}(\Delta_{2009} + 1)$ и

$$J = J_{2009}(v + 1) = J_{LIS}(\Delta_{2009} + 1)(v + 1), \quad (2)$$

здесь $J_{LIS} = 33.2 \text{ p}/(\text{m}^2 \text{ср ГВ})$ [Bisschop et al., 2019] интенсивность 10 ГВ частиц на границе гелиосферы с ошибкой $\sim 25\%$, $\Delta_{2009} = -0.19$ [Янке и др. 2023] амплитуда остаточной модуляции галактических КЛ в гелиосфере для базового периода 2009 года.

6. МОДЕЛЬ СИЛОВОГО ПОЛЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Если прогноз солнечной активности выполнен для потенциала ϕ солнечной модуляции КЛ, то оценку ожидаемых вариаций можно выпол-

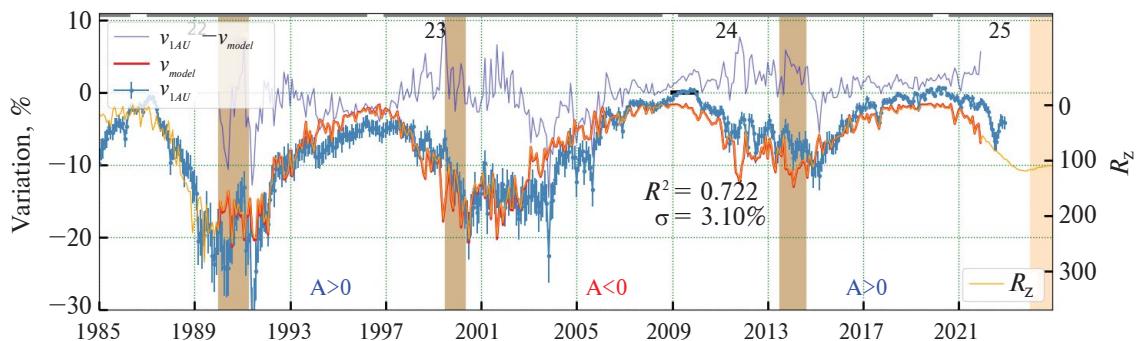


Рис. 3. Сравнение экспериментально найденных методом GSM амплитуды вариаций v галактических космических лучей жесткостью 10 ГВ за пределами магнитосферы и вариаций, определяемые моделью v_{model} (1). Показаны также невязки модели $v - v_{model}$.

нить в приближении силового поля. Для описания эффекта солнечной модуляции в этом приближении была разработана упрощенная параметрическая модель силового поля [Gleeson et al., 1968; Moraal, 2013; Vas et al., 2015]. Ее основой в режиме квазистационарности является уравнение диффузии, описывающее распространение частиц в сферически-симметричной гелиосфере с коэффициентом диффузии, зависящим только от жесткости частиц R и расстояния от Солнца r ; при этом отсутствуют источники КЛ. Аналитическое выражение, связывающее измеренный спектр и спектр частиц типа i на границе гелиосферы задается следующей однопараметрической формулой:

$$J_i(r, E_i) = J_{LIS,i}(r \rightarrow \infty, E + \Phi_i) \frac{E^2 - m^2}{(E + \Phi_i)^2 - m^2}, \quad (3)$$

где E – полная энергия частицы, m – масса частицы, $J(r, E + \Phi)$ – измеряемый поток КЛ, $J(r \rightarrow \infty, E + \Phi)$ – локальный межзвездный поток КЛ, $\Phi_i(r, t, E, Z/A) = \phi \cdot (eZ_i/A_i)$ средние потери энергии частиц с зарядом Z_i и массовым числом A_i в гелиосфере, определяемые потенциалом ϕ солнечной модуляции КЛ.

Данное приближение обеспечивает хорошее описание долговременных эффектов модуляции частиц с жесткостью от ~ 0.6 ГВ до десятков ГВ и включает эффективную (10 ГВ) жесткость частиц для нейтронных мониторов [Caballero-Lopez et al., 2004]. Методика оценки потенциала модуляции КЛ по космогенным данным описана в работе [Poluijanov et al., 2016].

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наша задача – предсказать интенсивность КЛ на ближайшее столетие по известным долговременным прогнозам солнечной активности. При-

чем, как отмечалось, мы привлекли два типа данных солнечной активности – числа солнечных пятен и потенциала солнечной модуляции КЛ. Это позволяет максимально независимо получить планируемый результат. Все прогнозы солнечной активности получены на тысячелетних временных рядах, хотя при создании модели вариаций КЛ мы вынуждены были ограничиться периодом космической эры, т.е. периодом проведения наземного мониторинга КЛ.

В разделе 3 были выделены три наименее противоречащих между собой прогноза солнечной активности (рис. 1) с неопределенностью до 100% [Barnard et al., 2011]. Оценка ожидаемой интенсивности КЛ по прогнозируемому числу солнечных пятен R_z выполнена на основе модели линейной парной корреляции (уравнение 1) между вариациями КЛ и числом солнечных пятен R_z .

Сравнение ожидаемых вариаций КЛ или соответствующих интенсивностей КЛ по трем прогнозам числа солнечных пятен [Herrera et al., 2021; Nasirpour et al., 2021; Vinos, 2022] проведено на рис. 4. Как и исходные данные числа солнечных пятен (рис. 1), полученные интенсивности КЛ для разных рядов данных в начальный момент в фазе, но к концу столетия постепенно расходятся примерно на 4 года. Непрерывной линией соединены точки максимумов вариаций (минимумов интенсивности) КЛ.

В работах [Steinhilber et al., 2013; Barnard et al., 2011] сделаны прогнозы потенциала ϕ солнечной модуляции КЛ. Для оценки интенсивности $J_i = (r, K, \phi)$ галактических КЛ вблизи Земли для жесткостей ~ 10 ГВ необходимо использовать приближение силового поля (3). В работе [Steinhilber et al., 2013] прогнозы потенциала солнечной модуляции КЛ выполнены двумя методами: Фурье

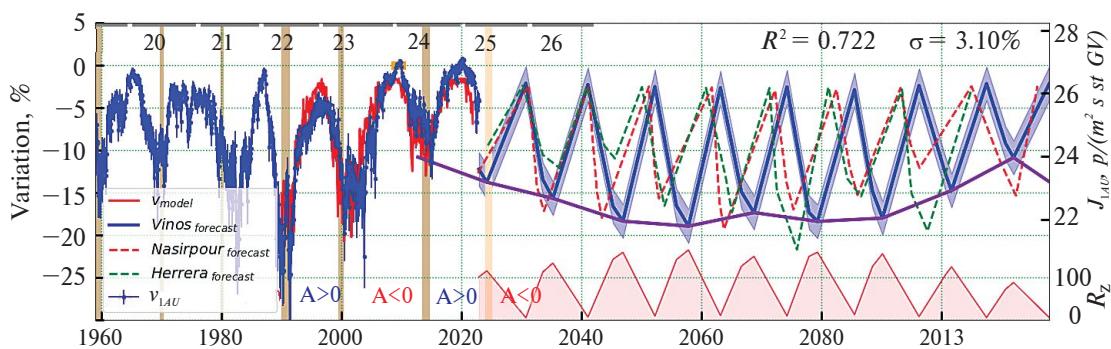


Рис. 4. Сравнение прогнозируемых вариаций/интенсивности для 10 ГВ (левая/правая шкала) на орбите Земли V_{LAE} в текущем столетии для трех прогнозов числа солнечных пятен [Herrera et al., 2021; Nasirpour et al., 2021; Vinos, 2022]. Непрерывной линией соединены максимумы вариаций (минимумы интенсивности) для прогноза [Vinos, 2022]. Схематически показана интенсивность КЛ в межзвездной среде J_{LIS} .

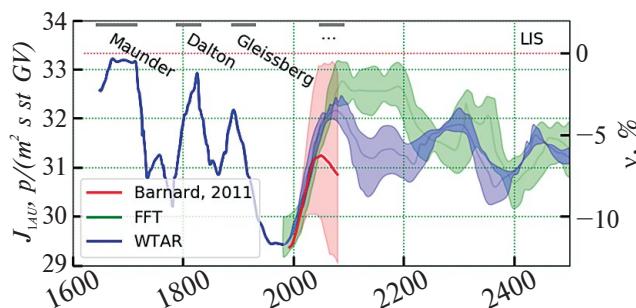


Рис. 5. Восстановленная интенсивность космических лучей J_{IAU} (левая шкала) и их вариации (правая шкала) на орбите Земли по прогнозируемому потенциалу солнечной модуляции космических лучей для трех моделей прогноза: [Steinheilber et al., 2013] – (FFT и WTAR) и [Barnard et al., 2011] (рис. 2).

анализ и вейвлет разложение, которые прогнозируют существенно различающиеся временные изменения интенсивности космических лучей (рис. 5). Причем метод Фурье анализа дает интенсивность КЛ для конца XXI века, характерную для минимума Дальтона, что явно противоречит всем прогнозам по числу солнечных пятен. Метод вейвлет разложения дает более реалистичный прогноз. Прогноз интенсивности КЛ на основе прогноза потенциала солнечной модуляции КЛ, выполненного в работе [Barnard et al., 2011], качественно согласуется с прогнозом [Steinheilber et al., 2013] только до середины XXI столетия и сильно расходится к его концу.

8. ВЫВОДЫ

Все долговременные прогнозы солнечной активности на XXI столетие базируются на общем экспериментальном материале – на наблюдаемом 400-летнем ряде числа солнечных пятен или на 9400-летнем ряде индексов солнечной активности, восстановленному по данным космогенных радионуклидов [Stuiver et al., 1998; Steinheilber et al., 2008], но прогнозы проводятся различными методами. Неопределенность прогнозов параметров СА нарастает и в конце столетия достигает ~100% [Barnard et al., 2011; Steinheilber et al., 2013]. Ошибка преобразования от параметра солнечной активности к интенсивности КЛ не превышает 10%.

1. Проведен совместный анализ девяти прогнозов числа солнечных пятен, выполненных различными авторами за последнее десятилетие. Выделено три взаимно не противоречащих прогноза солнечной активности на текущее столетие (рис. 1), выполненные различными методами. Согласно этим прогнозам максимум числа сол-

нечных пятен к середине XXI столетия достигает значений 200 и, в целом, спадает до значений 150 на рубеже веков.

2. Выполнен совместный анализ трех прогнозов потенциала солнечной модуляции КЛ, выполненных различными методами. Прогнозы удовлетворительно согласуются в первой половине XXI века, но противоречивы в конце столетия (рис. 2).

3. Установлено, что по данным прогноза числа солнечных пятен и привлекаемой модели вариаций КЛ (1) в середине XXI столетия ожидается некоторое понижение интенсивности КЛ (~6%) в максимумах солнечной активности (рис. 4), но в конце столетия интенсивность достигнет современных значений. Никакого глобального минимума солнечной активности в конце столетия не просматривается.

4. Также установлено, что для трех прогнозов потенциала солнечной модуляции КЛ наблюдается только качественное согласие для интенсивности КЛ (рис. 5) до середины XXI столетия. К концу столетия прогнозы существенно расходятся, а в случае прогноза [Steinheilber et al., 2013, модель FFT] ожидается даже минимум Дальтона, что противоречит прогнозам по числу солнечных пятен.

5. Предлагается проводить долговременные прогнозы непосредственно для рядов космогенных данных для уменьшения неопределенностей. Оценку интенсивности КЛ в таком случае следует проводить напрямую, без посредников.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

V. G. Yanke – ORCID: 0000-0001-7098-9094,
A. V. Belov – ORCID: 0000-0002-1834-3285,
R. T. Gushchina – ORCID: 0000-0002-5247-7404,
P. G. Kobelev – ORCID: 0000-0002-9727-4395,
L. A. Trefilova – ORCID: 0000-0002-2563-5550.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Олениева В.А., Абунина М.А., Абунин А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 374–389. 2018. <https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Исследование пространственно-временной структуры долгопериодных эффектов солнечной активности и вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 52. № 5. С. 626–638. 2012.
- Кудрявцев И.В., Юнгер Х. Вариации прозрачности атмосферы под действием галактических космических лучей как возможная причина их влияния на формирование облачности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 51. № 5. С. 668–676. 2011.
- Лушников А.А., Загайнов В.А., Любовцева Ю.С., Гевишиани А.Д. Образованиеnanoаэрозолей в тропосфере под действием космического излучения // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. Т. 50. № 2. С. 175–184. 2014. <https://doi.org/10.7868/S0002351514020072>
- Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т., Кобелев П.Г., Трепилова Л.А. Об остаточной модуляции галактических космических лучей в гелиосфере // Космич. исслед. Т. 61. № 1. 2023. С. 43–51. <https://doi.org/10.31857/S0023420622060115>
- Янчуковский В.Л. Реакция атмосферы на средних широтах на спорадические вариации космических лучей // Солнечно-земная физика. Т. 10. № 4. С. 1–8. 2024. <https://doi.org/10.12737/szf-101101101>
- Abreu J.A., Beer J., Ferriz-Mas A. Past and future solar activity from cosmogenic radionuclides // In Astronomical Society of the Pacific Conference Series: Soho-23: Understanding a Peculiar Solar Minimum. V. 428. P. 287–295. 2010.
- Barnard L., Lockwood M., Hapgood M.A., Owens M.J., Davis C.J., Steinhilber F. Predicting space climate change // Geophys. Res. Lett. V. 38. L16103. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL048489>
- Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Oleneva V., Abunin A., Abunina M., Papaioannou A., Mavromichalaki E. The Global Survey Method applied to Ground Level Cosmic Ray Measurements // Solar Physics. V. 293. Article number 68. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11207-018-1277-6>
- Bisschoff D., Potgieter M.S., Aslam O.P.M. New very local interstellar spectra for electrons, positrons, protons and light cosmic ray nuclei // The Astrophysical Journal. V. 878. № 1. Article number 59. 2019. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1e4a>
- Biswas A., Karak B.B., Usoskin I., Weisshaar E. Long-Term Modulation of Solar Cycles // Space Science Reviews. V. 219. Article number 19. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11214-023-00968-w>
- Bonev B.P., Penev K.M., Sello S. Long-term solar variability and the solar cycle in the 21st century // The Astrophysical Journal. V. 605. № 1. L81–L84. 2004. <https://doi.org/10.1086/420695>
- Caballero-Lopez R.A., Moraal H. // Limitations of the force field equation to describe cosmic ray modulation. // JGRA. V. 109. Issue A1. A01101. 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JA010098>
- Gleeson L.J., Axford W.I. Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays // Astrophys. J. V. 154. P. 1011. 1968. <https://doi.org/10.1086/149822>
- Clilverd M.A., Clarke E., Ulich T., Rishbeth H., Jarvis M.J. Predicting Solar Cycle 24 and beyond // Space Weather. V. 4. S09005. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005SW000207>
- Gray L.J., Beer J., Geller M., Haigh J.D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L. et.al. Solar influences on climate // Reviews of Geophysics V. 48. Issue 4. RG4001. <https://doi.org/10.1029/2009RG000282>
- Gulev S.K., Thorne P.W. Climate change 2021: The physical science basis. // 6th AR IPCC. London: Cambridge University Press. P. 422. 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
- Herrera V.M.V., Soon W., Legate D.R. Does Machine Learning reconstruct missing sunspots and forecast a new solar minimum? // Advances in Space Research. V. 68. Issue 3. P. 1485–1501. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.03.023>
- Hiremath K., 2008. Prediction of solar cycle 24 and beyond // Astrophys. Space Sci. V. 314. P. 45–49. <https://doi.org/10.1007/s10509-007-9728-9>
- Karak B.B., Miesch M. “Solar Cycle Variability Induced by Tilt Angle Scatter in a Babcock–Leighton Solar Dynamo Model” // The Astrophysical Journal. V. 847. Article number 69. 2017. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa8636>
- Kniveton D.R. Precipitation, cloud cover and Forbush decreases in galactic cosmic rays // J. Atmos. Solar Terr. Phys. V. 66. Issues 13–14. P. 1135–1142. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.05.010>
- Knudsen M.F., Riisager P., Jacobsen B.H., Muscheler R., Snowball I., Seidenkrantz M.S. Taking the pulse of the Sun during the Holocene by joint analysis of (^{14}C) and (^{10}Be) // Geophys. Res. Lett. V. 36. L16701. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009GL039439>
- Lockwood M. Solar change and climate: An update in the light of the current exceptional solar minimum. // Proc. R. Soc. A. V. 466. Issue 2114. P. 303–329. 2010. <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0519>
- Lockwood M., Owens M.J., Barnard L., Davis C.J., and Steinhilber F. The persistence of solar activity indicators and the descent of the Sun into Maunder Minimum conditions // Geophys. Res. Lett. V. 38. Issue 22. L22105. 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL049811>
- Moraal H. Cosmic-ray modulation equations // Space Sci. Rev. V. 176. P. 299–319. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9819-3>
- Morner N.A. The approaching new grand solar minimum and little ice age climate conditions // Natural Science. // V. 7. P. 510–518. 2015. <http://dx.doi.org/10.4236/ns.2015.711052>

- Nasirpour M.H., Sharifi A., Ahmadi M. Revealing the relationship between solar activity and COVID-19 and forecasting of possible future viruses using multi-step autoregression (MSAR) // Environmental Science and Pollution Research V. 28. P. 38074–38084. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13249-2>
- Palle E., Butler C.J., O'Brien K. The possible connection between ionization in the atmosphere by cosmic rays and low level clouds // J. Atm. Solar-Terr. Phys. V. 66. P. 1779–1790. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.07.041>
- Poluiakov S.V., Kovaltsov G.A., Mishev A.L., Usoskin I.G. Production of cosmogenic isotopes ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na , and ^{36}Cl in the atmosphere: Altitudinal profiles of yield functions // J. Geophys. Res. Atmos. V. 121. P. 8125–8136. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JD025034>
- Rigozo N.R., Nordemann D.J.R., Echer E., Echer M.P.S., Silva H.E. Prediction of solar minimum and maximum epochs on the basis of spectral characteristics for the next millennium // Planetary and Space Science. V. 58. P. 1971–1976. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.09.020>
- Salvador R.J. A mathematical model of the sunspot cycle for the past 1000 yr // Pattern Recogn. Phys. V. 1. P. 117–122. 2013. <https://doi.org/10.5194/prp-1-117-2013>
- Steinhilber F., Abreu J.A., Beer J. Solar modulation during the Holocene // Astrophys. Space Sci. Trans. V. 4. P. 1–6. 2008. <https://doi.org/10.5194/astra-4-1-2008>
- Steinhilber F., Beer J. Prediction of solar activity for the next 500 years // J. Geophys. Res. Space Physics. V. 118. P. 1861–1867. 2013. <https://doi.org/10.1002/jgra.50210>
- Stuiver M., Reimer P.J., Brajunas T. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples // Radiocarbon. V. 40. № 3. P. 1127–1151. 1998. <https://doi.org/10.1017/S0033822200019172>
- Tinsley B.A., Zhou L. Initial results of a global circuit model with stratospheric and tropospheric aerosols // J. Geophys. Res. V. 111. D16205. 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JD006988>
- Tinsley B.A. A working hypothesis for connections between electrically-induced changes in cloud microphysics and storm vorticity, with possible effects on circulation // Adv. Space Res. 2012. V. 50. Issue 6. P. 791–805. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.008>
- Usoskin I.G. A history of solar activity over millennia // Living Rev. Sol. Phys. V. 14. Article number 3. 2017. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- Vinos J. Climate of the Past, Present and Future. A Scientific Debate // Madrid: Critical Science Press. 279 p. 2022. <https://judithcurry.com/wp-content/uploads/2022/09/Vinos-CPPF2022.pdf>
- Vos E.E., Potgieter M.S. New Modeling of Galactic Proton Modulation during the Minimum of Solar Cycle 23/24 // Astrophys. J. V. 815. № 2. Article number 119. 2015. <https://doi.org/doi:10.1088/0004-637X/815/2/119>
- Xepapadeas A. Uncertainty and climate change: The IPCC approach vs decision theory // Journal of Behavioral and Experimental Economics. V. 109. 102188. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.socec.2024.102188>
- Yanke V.G., Belov A.V., Gushchina R.T., Kobelev P.G., Trefilova L.A. “Forecast of Modulation of Cosmic Rays with Hardness of 10 GV in the 25th Solar Activity Cycle” // Geomagnetism and Aeronomy. V. 64. No. 2. P. 201–210. 2024. <https://doi.org/10.1134/S0016793223601072>

Cosmic Ray Intensity Forecast for the Current Century

P. G. Kobelev¹, *, L. A. Trefilova¹, A. V. Belov¹, R. T. Gushchina¹, V. G. Yanke¹

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia*
*e-mail: kobelev@izmiran.ru

To diagnose and forecast the state of the heliosphere, as well as space weather and climate, it is necessary to know the temporal changes of galactic cosmic rays flux at the Earth's orbit. The aim of the work is to forecast the cosmic ray flux for the next century based on the relationship between the modulation of galactic cosmic rays and the characteristics of solar activity. For a long-term forecast, one parameter models of solar activity were used that determines the modulation of galactic cosmic rays – the number of sunspots or the potential of cosmic rays solar modulation. As a result, a long-term forecast of the cosmic ray flux was obtained based on the analysis of a dozen models of solar activity behavior for the next century. The analysis suggests that, contrary to earlier forecasts, the probability of a large solar minimum at the end of the 21st century is small. This is shown by the majority of long-term solar activity forecasts by various authors which was analyzed by us. An almost twofold increase in the level of solar activity is expected by the middle of the century and a subsequent transition to approximately current level at the end of the century. Reduced intensity of galactic cosmic rays is expected at the Earth's orbit by mid-century.

Keywords: solar activity, sunspot number, forecast, modulation, intensity of galactic cosmic rays