

К ВОПРОСУ МОДУЛЯЦИИ ПОТОКА ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Григорьева И.Ю.¹, Ожередов В.А.², Струминский А.Б.²

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

ON THE ISSUE OF MODULATION OF GALACTIC COSMIC RAYS BY SOLAR ACTIVITY

Grigoryeva I.Yu.¹, Ozheredov V.A.², Struminsky A.B.²

¹Main Astronomical (Pulkovo) Observatory RAS, St.-Petersburg, Russia

²Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

A BootStrap-algorithm was used to test the hypothesis that GCR variations are under "control" of the Bpol scenario (after the moment of "polarity reversal"). Data from the Moscow neutron monitor and WSO observations of the polar magnetic field, Bpol were used. In the dynamics of the GCR flux an evidence of a prolonged change in the sign of the dipole magnetic field of the Sun (the tracer of which was Bpol data) was found statistically. The ordering of the magnetic field of the solar wind in the heliosphere according to the Bpol sign after the 1-st bifurcation - "reverse polarity", and its absence up to this point, has been confirmed. A 2-nd bifurcation was found statistically, which is better pronounced in odd cycles and associated, apparently, with libration into the solar wind of coronal magnetic field with polarity of the current magnetic cycle only.

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2024-93-96>

В ходе экспериментов по регистрации галактических космических лучей (ГКЛ) с конца 1940-х годов (на постоянной основе с 1957 года, данные нейтронного монитора Москва, НМ Москва [1]) прослеживается зависимость их интенсивности от солнечной активности. Эта зависимость получила название модуляция потока ГКЛ [2], которая является результатом взаимодействия ГКЛ с солнечным ветром и его магнитным полем. Интерес к модуляции ГКЛ в зависимости от фазы и кратности солнечного цикла возник, когда стали доступными их непрерывные наблюдения за полный магнитный цикл [см., 3–5 и ссылки там]. С середины 70-ых начались регулярные измерения магнитного поля Солнца [6], давшие возможность связывать свойства магнитного поля солнечного ветра с дипольным магнитным полем Солнца, в качестве которого можно использовать полярное магнитное поле (Bpol, фильтрованные среднемесячные данные Wilcox Solar Observatory, WSO [7]). Авторы работы [3] первыми показали необходимость учета знака заряда частицы и полярности магнитного поля в задаче распространения космических лучей.

На данный момент есть 4,5 цикла измерений ГКЛ и Bpol, совпадающих во времени, что позволяет рассматривать проблему модуляции в це-

лом. Учитывая циклы в целом и гладкость обеих кривых (измерения ГКЛ и V_{pol}), данных статистически мало – всего 4,5 цикла. Один из ключевых моментов – определение начала модуляции ГКЛ в данных циклах. Мы выбрали за 0 момент максимума потока ГКЛ в каждом цикле, как это было сделано в [8]. Проблему отсутствия статистически значимого числа моментов «переполюсовки» мы решаем методом многократной генерации выборки. Здесь за «переполюсовку» формально мы берем момент перехода через 0 фильтрованного среднемесячного магнитного полярного поля, V_{pol} [7].

Используется *BootStrap*-алгоритм, генерирующий ансамбль из большого числа кривых V_{pol} , таких, что их автоковариационные свойства совпадают с нативной кривой, а моменты переполюсовки отличаются по времени от моментов переполюсовки у нативной кривой. Зависимость между модуляцией ГКЛ и V_{pol} нестационарна, измерение линейной нестационарной связи при помощи взвешенного коэффициента корреляции с весами, функционально зависящими от чётности и фазы цикла, показывает лишь на 15% от всего времени совместных наблюдений корреляцию 0.85. Поэтому мы используем понятие «сценария» (влияние знака и величины дипольного магнитного поля Солнца на интенсивность ГКЛ в ходе циклов – гипотезы об «управлении» V_{pol} модуляцией ГКЛ). Проверяемая гипотеза: до момента «переполюсовки» ГКЛ не ощущают знака V_{pol} , а подвержены его влиянию, наоборот, после (см. рис. 2). Таким образом, ход сценария может иметь нарушения, соответствующие изменениям интенсивности потока ГКЛ, что показал *BootStrap*-алгоритм. Технически – это нарезка обоих выборок на периоды в 4000 дней от максимума потока ГКЛ, и оценка соответствия динамики потока ГКЛ изменению сценария (справа от точки бифуркации) нашим представлениям о его «управляемости» полярным магнитным полем V_{pol} .

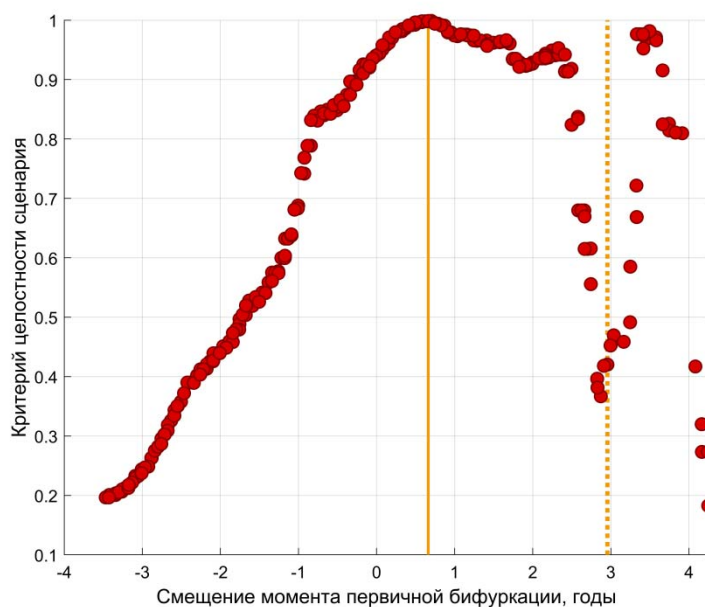


Рис. 1. Диаграмма рассеяния для итераций *BootStrap*-алгоритма. Итерации: красные кружки (2000 шт.); 1-ая/2-ая бифуркации (сплош./пунктир. верт. линии). Ось X – годы, 0 – положение наибольшего сближения друг к другу кривых V_{pol} во всех итерациях.

На рис. 1 видна 1-ая бифуркация сценария Bpol (предполагаемая, *сплошная* линия) и 2-ая – (обнаруженная алгоритмом, *пунктирная* линия). Они произошли спустя 4.9 года и 7.2 года от начала нарезки выборки, t_1 и t_2 соответственно. После t_1 и t_2 нарушалась динамика модуляции ГКЛ.

Изменения выпуклой формы кубического сплайна (сглаженные данные НМ) на вогнутую для нечетных и, наоборот, для четных циклов происходят при переходе *сплошной* вертикальной линии на рис. 2а. Наиболее сильные изменения амплитуды потока ГКЛ слева от *сплошной* линии в 22-ом цикле (сглаженные *черным* кубическим сплайном) имеют источник солнечного происхождения – мощные эруптивные геоэффективные события 1989–1991 гг. Кроме того, алгоритм показал, что потоки ГКЛ подвержены еще одному изменению сценария (*пунктирная* вертикальная линия на рис. 2а) через 7.2 лет от 0, который согласуется с динамикой циклов нативных кривых Bpol (рис. 2б).

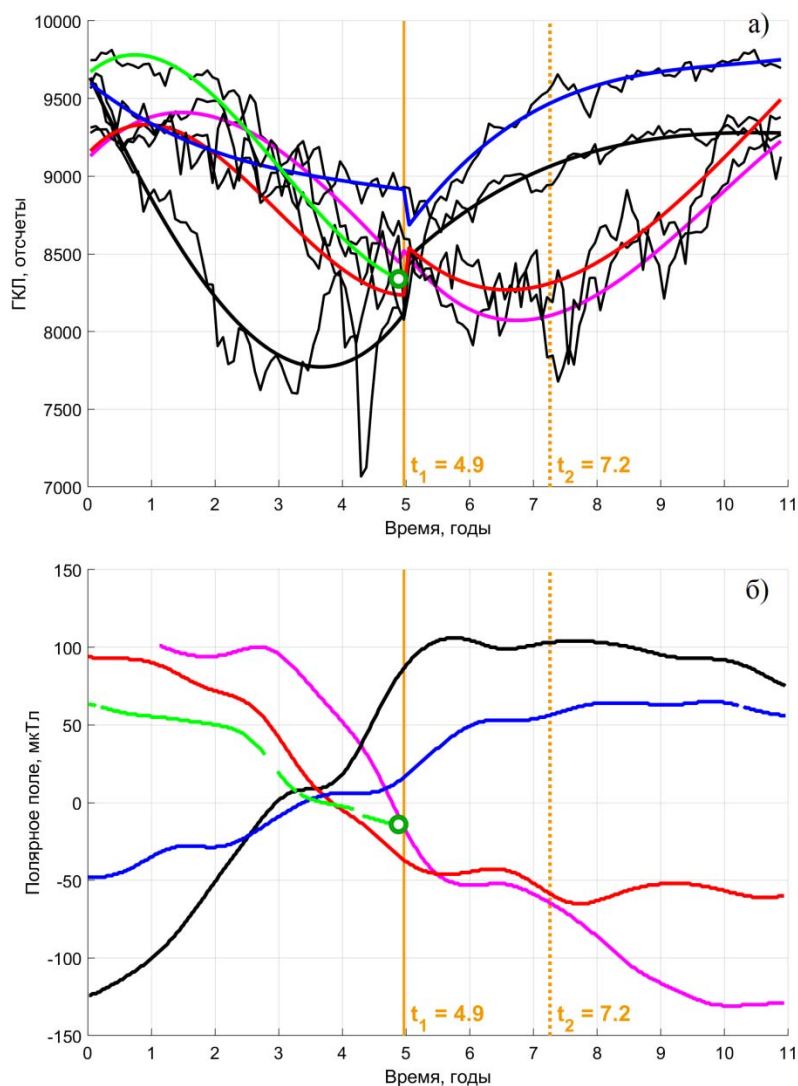


Рис. 2. (а) Динамика потока ГКЛ (данные НМ Москва) в зависимости от кратности циклов (*черные* ломанные кривые), сглаженная кубическим сплайном: *розовый* 21-ый, *красный* – 23-ий, *зеленый* часть слева — 25-ый нечетные и *толстый черный* – 22-ой, *синий* – 24-ый четные циклы. (б) Ход полярного магнитного поля Солнца (Bpol) в зависимости от «сценариев» циклов. Цвета указаны согласно номеру цикла. Верт. линии (см. рис. 1). Начало оси X – тах потоков ГКЛ. *Зеленый* пустой кружок – данные на момент написания статьи.

Второе изменение сценария нагляднее видно в 21-ом и 23-ем циклах, выделенных *розовым* и *красным* цветом, сразу после 2-ой бифуркации краткосрочные изменения амплитуды соответствуют солнечным источникам, отмеченным в работе [9] по наблюдениям AMS электронов и протонов ГКЛ в 2011–2022 гг. В 21-ом цикле после 2-ой бифуркации началось интенсивное накопление нового магнитного потока для сильного 22-го цикла. В 23-ем цикле, наоборот, не происходило накопления магнитного потока, что привело к слабому 24-му циклу [10]. Такие изменения в полярном магнитном поле V_{pol} моделируются в работе [11] в рамках представления хаотического возникновения биполярных областей и их роли в динамике цикла (см. рис. 5d в [11]).

- Статистически подтверждена смена сценария динамики интенсивности потока ГКЛ после 1-ой бифуркации с учетом кратности циклов – упорядоченность магнитного поля солнечного ветра в гелиосфере согласно знаку V_{pol} .

- Статистически обнаружена 2-ая бифуркация в сценарии V_{pol} (более выражена в нечетных циклах), связанная, по всей видимости, с наличием в гелиосфере полярности только текущего магнитного цикла, что также отражается в динамике потоков ГКЛ в ходе солнечного цикла.

- Таким образом, в динамике потока ГКЛ (по данным отсчетов НМ Москва) статистически обнаружено свидетельство продолжительной смены знака гелиосферного магнитного поля, которое отражает свойства дипольного поля Солнца (его трассером рассматривались данные V_{pol} WSO).

Литература

1. <http://cr0.izmiran.ru/mosc/>
2. Parker, E.N. // Planetary Space Sci., 1965, 13, 9–49.
3. Jokipii J.R., Levy E.H., and Hubbard W.B. // Astrophys. J., 1977, 213:861-868.
4. Jokipii J.R., Thomas B. // Astrophys. J., 1981, 243:1115-1122.
5. Крайнев М.Б. и др. // Солнечно-земная физика, 2023, т. 9, № 4, с. 5-20.
6. Svalgaard L. and Wilcox J. // Ann. Rev. Astron. Astrophys., 1978, V. 16, P. 429-443.
7. <http://wso.stanford.edu/Polar.html>
8. Struminsky et al. // 32nd GA IAU 2024, Capetown, South Africa, poster id. 383.
9. Aguilar M., et al., (AMS Collaboration) // Phys. Rev. Lett., 2023, 130, 161001.
10. Jiang J., Cameron R. H., and Schüssler M. // Astrophys. J. Lett., 82015 08:L28 (6 pp).
11. Kumar P., Karak B.B. and Sreedevi A. // MNRAS, 2024, 530, pp. 2895–2905.