

УДК 523.9, 524.1-352

АНОМАЛЬНЫЕ КВАЗИРЕКУРРЕНТНЫЕ ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СЕНТЯБРЕ 2014 – ФЕВРАЛЕ 2015 Г.

© 2024 г. Н. С. Шлык¹*, А. В. Белов¹, В. Н. Обридко¹, М. А. Абунина¹, А. А. Абунин¹

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

*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

Поступила в редакцию 29.09.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

Исследована аномалия поведения галактических космических лучей в сентябре 2014 г. — феврале 2015 г., проявившаяся в значительной модуляции их потока с периодом, близким к периоду вращения Солнца. Проанализировано состояние солнечного магнитного поля, изменение параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в указанный период. Обсуждаются причины возникновения долготной асимметрии в распределении галактических космических лучей во внутренней гелиосфере. Установлено, что исследуемый период делится на две части с различными физическими условиями на Солнце. Получены выводы об определяющем совместном влиянии спорадических и рекуррентных событий: многократно возобновляемых “магнитных ловушек”, созданных последовательными корональными выбросами масс из одной долготной зоны, и аномально расширившимися полярными корональными дырами с усиленным магнитным полем.

DOI: 10.31857/S0016794024020073, EDN: DYVLAX

1. ВВЕДЕНИЕ

Во время начала фазы спада 24-го цикла солнечной активности интенсивность потока галактических космических лучей (ГКЛ), измеренная нейтронными мониторами (НМ) различной жесткости, показала очень сильную изменчивость, согласующуюся с периодом вращения Солнца. На рис. 1 приведены вариации

плотности ГКЛ (для частиц с жесткостью 10 ГВ), полученные методом глобальной съемки [Белов и др., 2018] для мировой сети станций НМ. Описываемая квазидвадцатисемидневная периодичность необычно высокой амплитуды (до 11%) начала проявляться на границе августа и сентября 2014 г. и продолжалась до начала марта 2015 г. Впервые на это обращается внимание в работе Gil and Mursula [2015].



Рис. 1. Вариации ГКЛ (жесткостью 10 ГВ) за 2012—2017 гг. по данным сети нейтронных мониторов со скользящим 27-дневным усреднением. Исследуемый период выделен прямоугольником.

27-дневная вариация космических лучей (КЛ) обнаружена уже много десятилетий назад, еще в 30—40-е гг. XX века. Первые работы относятся к изучению данных ионизационных камер [Monk and Compton, 1939; Vallarta and Godart, 1939; Broxon, 1941], авторы не только указали на существование тенденции к 27-дневной повторяемости интенсивности космического излучения, но и оценили амплитуду вариации в 0.2—0.4%. Позднее в работах [Дорман и Фейнберг, 1956; Алания и Шаташвили, 1974; Базилевская и др., 1976; Altukhov et al., 1977 и др.] были высказаны предположения о возможной связи наблюдаемой 27-дневной вариации интенсивности КЛ с асимметричным распределением активных областей (АО) на Солнце и/или воздействием рекуррентных потоков из корональных дыр (КД). Modzelewska and Alania [2013] и Gil and Alania [2016] позднее предположили, что особенности амплитуды 27-дневных вариаций и их зависимость от глобального магнитного поля Солнца могут быть обусловлены крупномасштабными структурами скорости солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) с их устойчивыми продольными асимметриями.

В конце 2014 г. обсуждаемая квазидвадцатисемидневная вариация стала необычно большой. Аномальный период охватил приблизительно 6 кэррингтоновских оборотов (2154—2160), и в каждом из них изменения плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ составляли 6—11% и демонстрировали регулярный почти рекуррентный характер (см. рис. 1). Такую большую квазидвадцатисемидневную вариацию ранее не регистрировали. Gil and Mursula [2015] связали наблюдаемый эффект с быстрым ростом полярной КД в Южном полушарии, что привело к очень асимметричной магнитной конфигурации в средних и высоких гелиосферных широтах. Позднее другая группа авторов [Сдобнов

и др., 2019] (для более короткого периода, ноябрь—декабрь 2014 г.) высказала похожее предположение, что из-за воздействия южной КД в межпланетном пространстве образовалась долгоживущая коротирующая ловушка такой конфигурации, при которой для КЛ с энергией $\sim 3\text{—}20$ ГэВ наиболее эффективно происходила потеря энергии, за счет чего в наземных измерениях интенсивности КЛ наблюдалась аномально большая амплитуда 27-дневной вариации. Несмотря на существование нескольких вышеупомянутых публикаций нам представляется, что полного понимания причин обсуждаемой аномалии все еще нет.

На рис. 2 приведены вариации поглощенной дозы от ГКЛ по данным *Radiation Assessment Detector* (RAD) на борту ровера *Curiosity* на Марсе [Hassler et al., 2014] и вариации КЛ по данным сети наземных станций НМ (часовые значения, полученные методом глобальной съемки для частиц жесткостью 10 ГВ) за период с марта 2014 г. по июль 2015 г. Хорошо видно, что 27-дневная повторяемость выражена в данных обоих детекторов, несмотря на значительно отличающиеся эффективные жесткости и местоположение, что также свидетельствует о связи с измененными характеристиками всей внутренней гелиосферы, а не только околоземных условий. Стоит отметить, что в исследуемый период Марс находился на значительном удалении к востоку от Земли, однако он тоже попал под влияние описываемых ниже факторов, хоть и в меньшей степени (учитывая, что RAD измеряет потоки частиц значительно меньших энергий, $E < 150$ МэВ/нуклон).

Целью данной работы является анализ имеющихся данных и поиск возможных причин возникновения необычно больших амплитуд квазидвадцатисемидневной вариации потока ГКЛ в 2014—2015 гг. с использованием сведений о солнечных

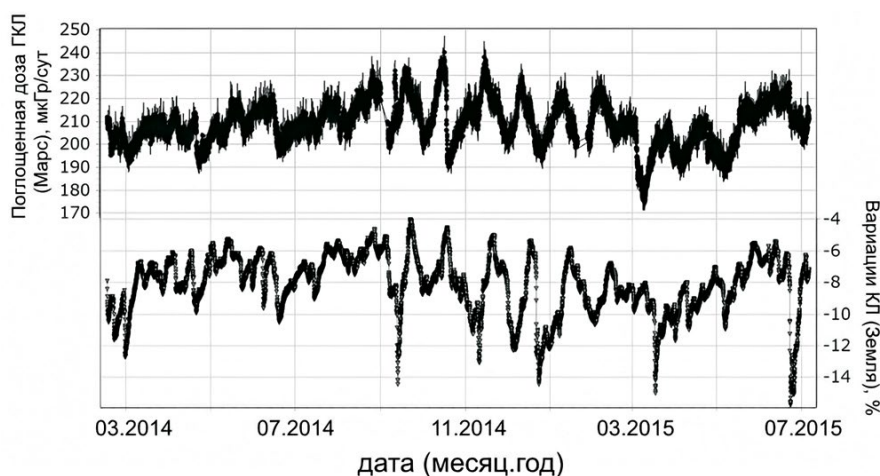


Рис. 2. Вариации поглощенной дозы ГКЛ по данным детектора RAD на Марсе и вариации КЛ по данным сети наземных станций НМ за период март 2014 г. — июль 2015 г.

магнитных полях, состоянии солнечного ветра, межпланетного магнитного поля.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

В работе используются данные мировой сети НМ (NMDB, <http://www01.nmdb.eu/>), обработанные методом глобальной съемки [Белов и др., 2018] для частиц с жесткостью 10 ГВ. Параметры СВ и ММП взяты из базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>), характеристики полярного и коронального поля Солнца — по наблюдениям обсерватории WSO (<http://wso.stanford.edu/>). Характеристики корональных дыр — с сайтов (https://solen.info/solar/coronal_holes.html) и (<https://www.solarmonitor.org/>). Данные по межпланетным возмущениям и сопутствующим Форбуш-эффектам (ФЭ) собраны в базе данных FEID (<http://tools.izmiran.ru/feid>).

3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛНЦА

Что же происходило на Солнце во время обычных вариаций КЛ в 2014—2015 гг.? Прежде всего, напомним, что именно 2014 г. является годом максимума солнечной активности 24-го цикла, который (по сглаженным числам пятен) пришелся на апрель этого года (<https://www.sidc.be/SILSO/datafiles>). Стоит отметить, что солнечный цикл, в котором находится обсуждаемый период, начался после затяжного глубокого минимума

активности, и напряженность солнечных магнитных полей была в два раза ниже, чем в предыдущих трех циклах [Безродных и др., 2019; Ишков, 2022] и ссылки в них. Исследуемый период приходится на начало фазы спада 24-го цикла.

На данный момент уже опубликовано несколько работ по исследованию процесса переполюсовки полярного магнитного поля в 24-м солнечном цикле [Mordvinov and Yazev, 2014; Karna et al., 2014; Petrie et al., 2014; Пишкало и Лейко, 2016 и др.]. В частности, в работе Svalgaard and Kamide [2013] авторы указывают на то, что первой переполюсовка, как и ожидалось, произошла в Северном полушарии. Sun et al. [2015] получили, что среднее магнитное поле на широтах $> 60^\circ$ изменило свою полярность в Северном и Южном полушариях соответственно в ноябре 2012 и в марте 2014 г. В работе Karna et al. [2014] получено, что процесс переполюсовки в Северном полушарии закончился еще раньше, к середине 2012 г. На рис. 3 приведены данные обс. WSO (<http://wso.stanford.edu/Polar.html>), также подтверждающие окончание процесса переполюсовки до начала исследуемого периода, выделенного затемненной областью. Однако детальный анализ данных по солнечному магнитному полю в этот период свидетельствует о более сложной ситуации. Хорошо заметно, что скорости роста величины магнитного поля в Северном и Южном полушариях различаются, и модуль южного полярного поля значительно превышает величины, регистрируемые на севере.

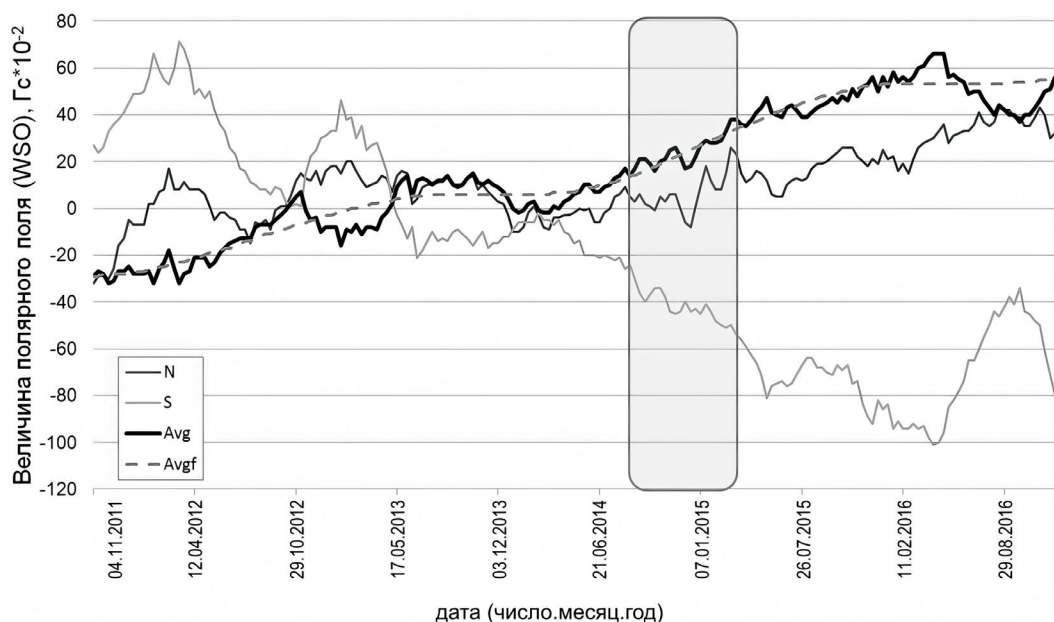


Рис. 3. Величина полярного поля за период с 14 ноября 2011 г. по 7 декабря 2016 года по данным обсерватории WSO. N — магнитное поле в Северном полушарии, S — в Южном, Avg — среднее значение (по модулю), Avgf — среднее значение с применением фильтра низких частот (<http://wso.stanford.edu/Polar.html>).

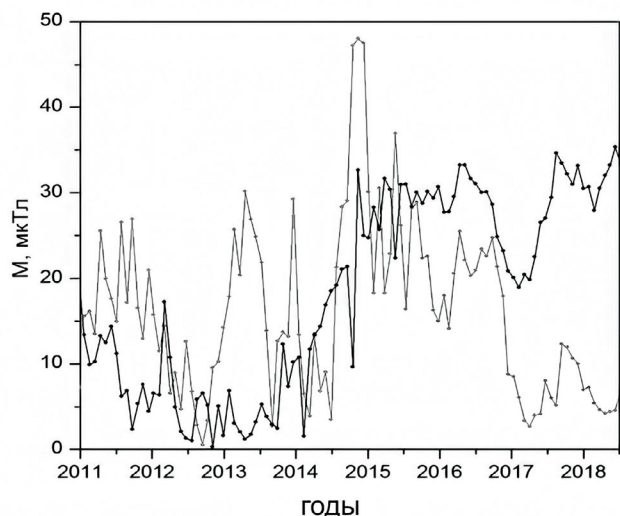


Рис. 4. Величина магнитного диполя на Солнце в 2011—2018 гг. Серая кривая — экваториальный диполь, черная — осевой диполь.

Если обратиться к данным по величинам магнитных диполей на Солнце (см. рис. 4), то период конца 2014 — начала 2015 г. очень сильно выделяется, поскольку величина экваториального диполя имеет аномально высокие значения.

В начале исследуемого периода он резко растет, достигая пика в конце 2014 г., затем снижается, но все равно остается существенно повышенным. Такие значения могут быть проявлением и причиной

большой долготной асимметрии. Здесь и далее расчеты магнитных полей опираются на методику экстраполяции поля в потенциальном приближении на основе данных наблюдений продольного магнитного поля на уровне фотосферы. Эти данные получены в obs. WSO (<http://wso.stanford.edu/forms/prsyn.html>). В расчетах предполагается выполнение потенциального приближения от уровня фотосферы до поверхности источника (2.5 радиуса Солнца от центра), на которой потенциал считается равным нулю и все силовые линии радиальны. Методика позволяет вычислять структуру магнитного поля и вклад его отдельных составляющих (диполя, квадруполя и т.д.). Более подробное описание можно найти в работах [Обридко и др., 2006; Obridko et al., 2021] и ссылках в них.

Долготную асимметрию, в частности, можно видеть в изменениях в магнитном поле на поверхности источника, в этот период наблюдается хорошо выраженная двухсекторная структура с аномально сильным полем в обоих секторах (см. рис. 5, нижняя панель).

Подобное поведение величин солнечных крупномасштабных магнитных полей в конце 2014 г. также описывается в работе Sheeley and Wang [2015]. Авторы называют это явление “омоложением” магнитного поля Солнца и приходят к выводу, что оно наблюдалось и в предыдущих трех солнечных циклах, также в начале фазы спада.

В период с августа по декабрь 2014 г. общим свойством является аномально высокая амплитуда

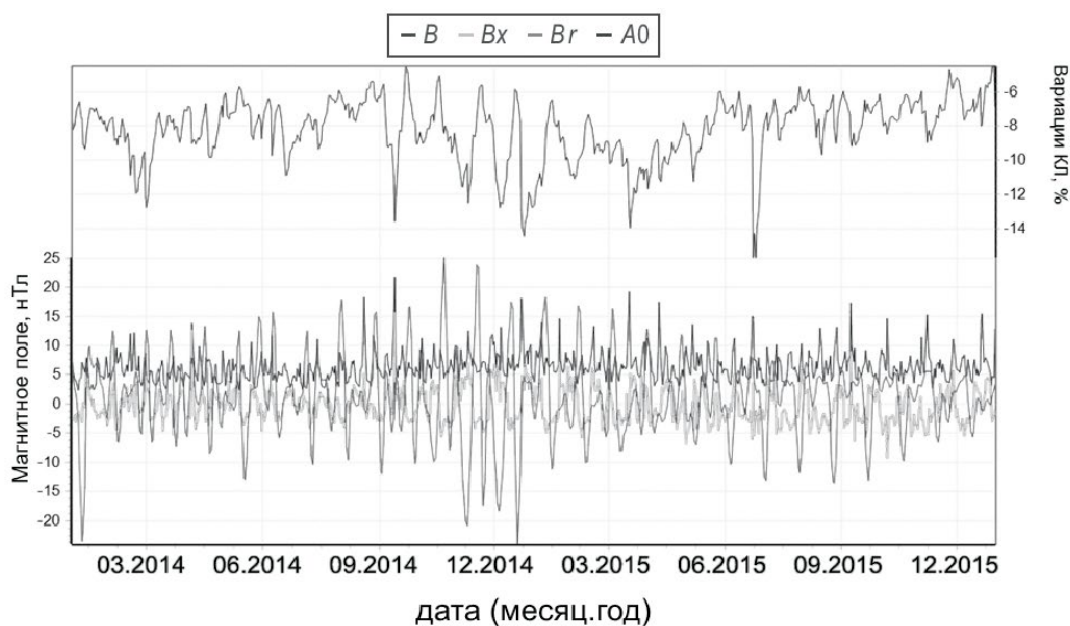


Рис. 5. Вариации плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ (верхняя панель, правая шкала, среднесуточные значения) и величины магнитного поля (нижняя панель, левая шкала): темно-серая кривая — поле на поверхности источника (Br) в той точке, в которой солнечный ветер направлен к Земле, светло-серая — радиальная компонента ММП (Bx), черная — модуль ММП (B).

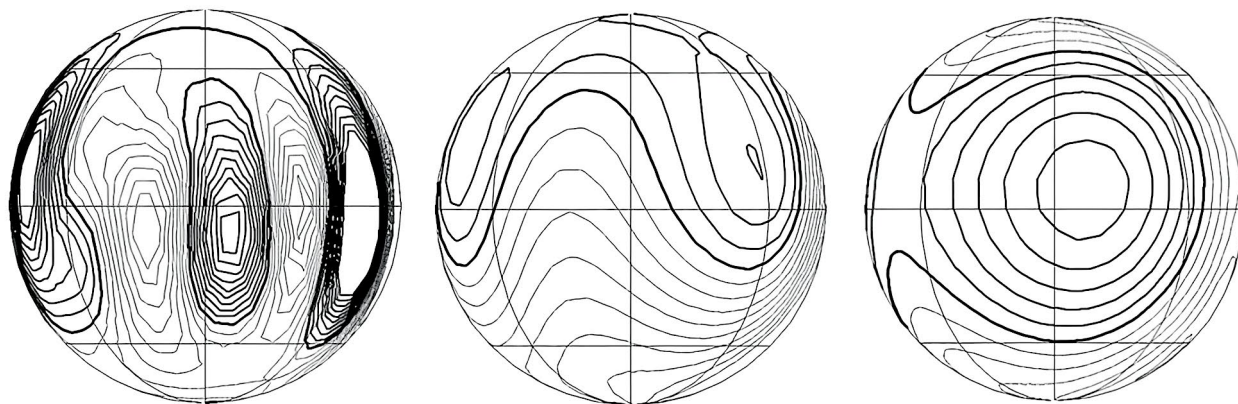


Рис. 6. Слева направо: магнитное поле на уровне фотосферы, поле на поверхности источника, поле квадрупольа на фотосфере. Здесь и далее на рисунках темно-серые изолинии — направление магнитных линий от Солнца, светло-серые — к Солнцу, черной кривой обозначена нейтральная линия.

колебаний, но говорить о единой 27-дневной повторяемости не стоит. Скорее всего, есть период с конца августа до середины октября, затем некоторый фазовый сбой и следующий период с конца октября 2014 г. до февраля 2015 г.

Похоже, что первый и второй периоды связаны с разными КД. Причем в первом периоде проявляется воздействие северной КД, с той особенностью, что ее основу составляет вовсе не диполь, а более высокие гармоники, начиная с квадрупольа. На рис. 6 приведены карты магнитного поля Солнца

для начала аномального периода, а именно 9 сентября 2014 г.

Сильная вариация (см. рис. 4—5) наблюдается тогда, когда полюс дипольа или квадрупольа лежит в плоскости экватора. Когда вся эта структура еще была за восточным лимбом и в последующие дни, в ней были зарегистрированы очень энергичные выбросы (подробнее о них в разделе 5).

На рис. 7 (слева) показан интегральный снимок Солнца, показывающий структуру активности на Солнце в ту же дату, 9 сентября 2014 г. (<https://www.solen.info>

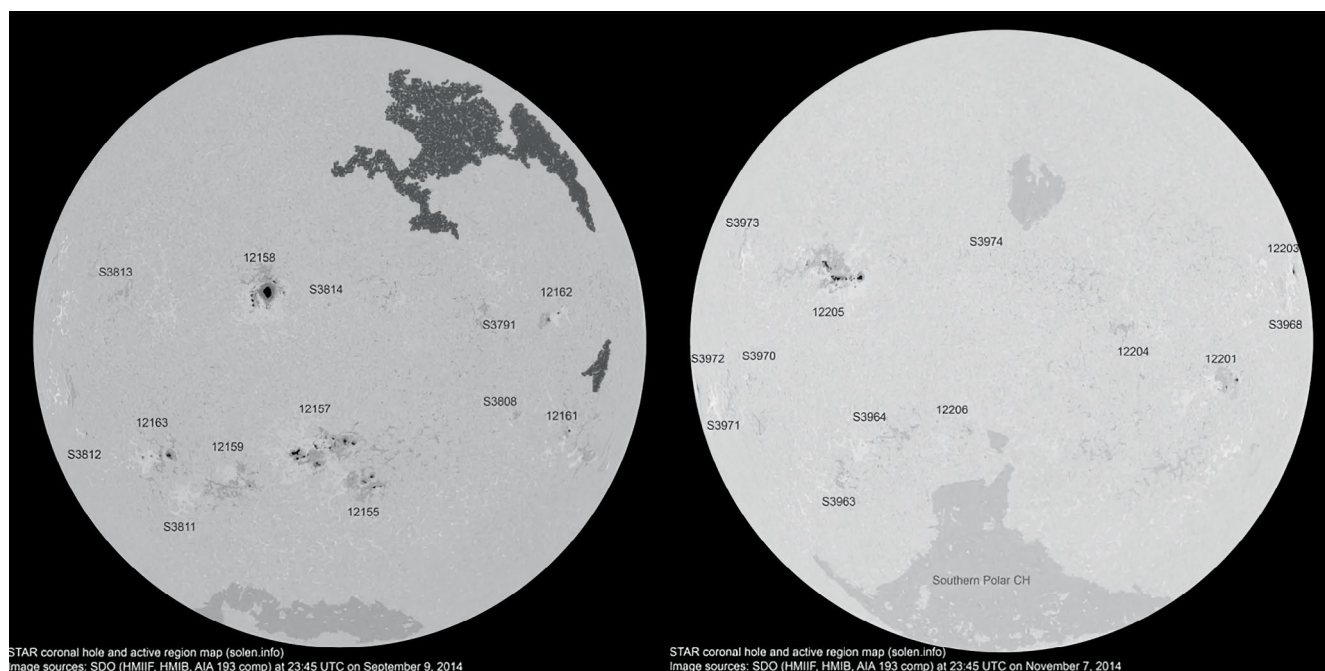


Рис. 7. Интегральные снимки Солнца от 9 сентября 2014 г. (слева) и 7 ноября 2014 г. (справа), адаптировано по данным сайта: <https://www.solen.info/solar/>

solen.info/solar/). По существу, КД в центре диска почти не видна, но зато элементы активности (нумерованные активные области) образуют мощный квадруполь (см. рис. 6), который в совокупности с относительно слабой КД приводит к возникновению устойчивой рекуррентности.

В работе Sheeley and Wang [2015] также было высказано предположение о том, что упорядоченные особым образом активные области в исследуемый период как раз и привели к зарегистрированному обс. WSO увеличению открытого магнитного потока на Солнце.

Второй период (ноябрь 2014 г. — февраль 2015 г.) связан с КД, которая имеет другой знак и связана

с Южным полюсом. В ней дипольная составляющая более важна, чем более высокие гармоники, соответственно у этих двух дыр разная физика и разные условия выхода вещества в гелиосферу. На рис. 7 (справа) показан интегральный снимок Солнца от 7 ноября 2014 г. Хорошо видна южная полярная КД значительной площади, а также низкоширотная КД той же полярности.

На рис. 8 показана синоптическая карта магнитного поля на поверхности фотосферы (сверху) и на поверхности источника (снизу), центрированная на 9 ноября 2014 г. (этому дню присваивается значение 180° гелиографической долготы). Кружками на нижней панели показаны основания открытых силовых линий, которые и обрисовывают видимую на правой панели рис. 7 южную полярную КД.

На рис. 9 показано магнитное поле на сфере на поверхности источника (слева) и поле диполя (справа, гармоника с $L = 1$). Видно, что именно экваториальный диполь привел к образованию мощной корональной дыры, и это проявилось во всплеске его интенсивности (см. рис. 4) в ноябре — декабре 2014 г.

4. ПОВЕДЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Описанные выше изменения магнитного поля Солнца, безусловно, отразились на состоянии межпланетного магнитного поля и солнечного ветра, регистрируемого у орбиты Земли. Вышеупомянутая двухсекторная структура хорошо видна на картах полярности межпланетного магнитного поля (рис. 10, по данным <https://www.izmiran.ru/magnetism/polar/SSIMF/?#2014>).

Видно, что в начале исследуемого периода (в июле, августе, сентябре) 27-дневная повторяемость в СВ

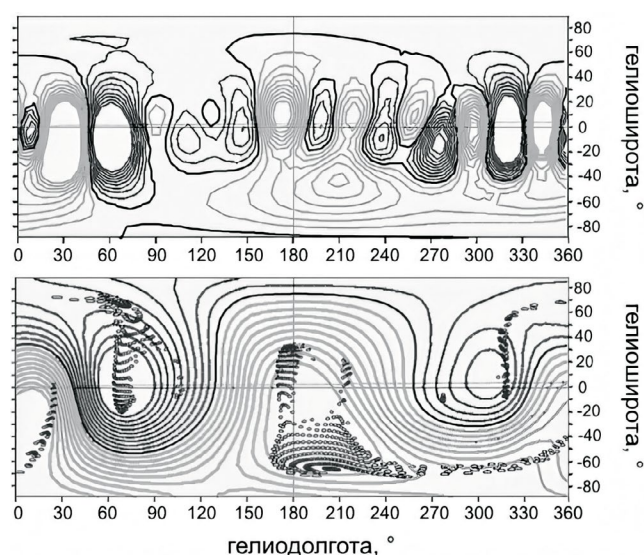


Рис. 8. Синоптические карты магнитного поля на поверхности фотосферы (вверху) и на поверхности источника (внизу), центрированные на 9 ноября 2014 г. По горизонтальной оси отложены гелиографические долготы, по вертикальной — широты (в градусах). Кружками показаны основания открытых силовых линий.

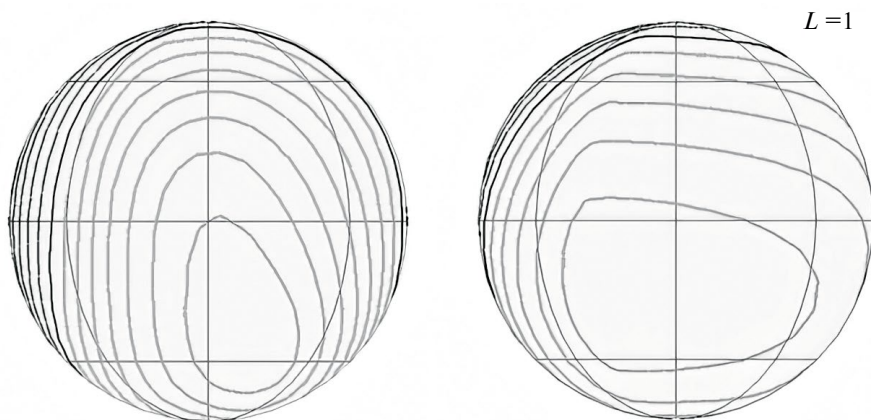


Рис. 9. Магнитное поле на сфере на поверхности источника (слева) и поле диполя (справа, гармоника с $L = 1$).

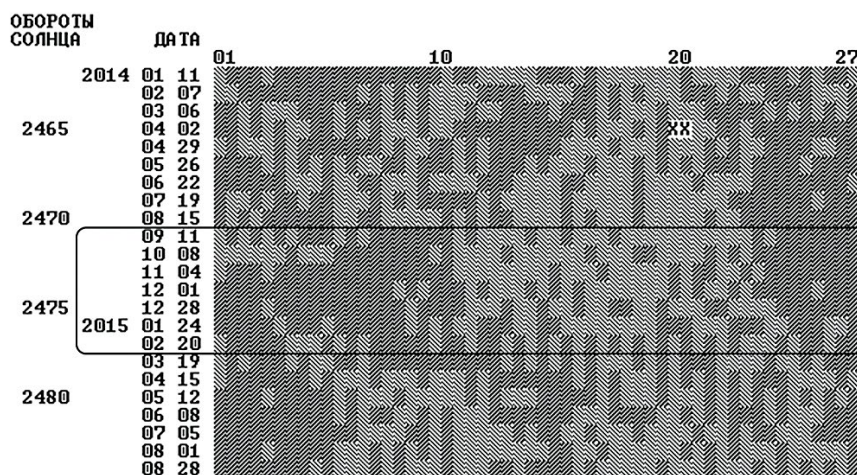


Рис. 10. Распределение полярности ММП по 27-дневным периодам (по Бартельсу) за 2014—2015 гг. На верхней шкале — дни оборота Бартельса. Прямоугольником выделен обсуждаемый период.

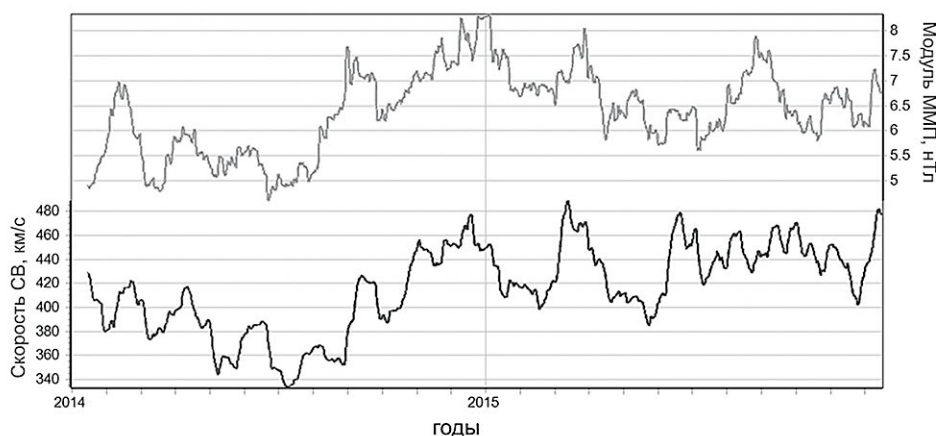


Рис. 11. Вариации скорости СВ и индукции ММП у Земли (скользящее 27-дневное усреднение) в 2014—2015 гг.

опиралась на более четко выраженный сектор с полем, направленным от Солнца (на рисунке показан светло-серым цветом). Затем после перерыва в один оборот, начиная с ноября 2014 г., сформировался более четкий сектор с полем, направленным к Солнцу (показан темно-серым цветом). Эта новая ситуация устойчиво просуществовала до конца января 2015 г., после чего постепенно исчезла.

На рис. 11 приведены данные по величинам ММП (верхняя кривая, правая ось) и скорости СВ у Земли (нижняя кривая, левая ось) со скользящим 27-дневным усреднением за 2014—2015 гг. Хорошо видно, что в конце августа — начале сентября 2014 г. ситуация в солнечном ветре у Земли резко меняется.

Во-первых, почти одновременно увеличиваются и скорость СВ, и величина модуля индукции

ММП, и этот рост значителен: среднесуточное значение B в исследуемый полугодовой период увеличивается в 1.33 раза, а скорость V возрастает на 57 ± 2 км/с.

В табл. 1 приведены среднесуточные значения величин скорости СВ (V , км/с) и модуля ММП (B , нТл) в интересующий нас период, а также в предыдущие полгода.

Отметим, что Sheeley and Wang [2015] также описывают, что во второй половине 2014 г. величина радиальной компоненты ММП увеличилась в 2 раза из-за роста открытого магнитного потока на поверхности Солнца.

Во-вторых, изменения в магнитном поле и скорости СВ явно коррелированы. Из этого может следовать, что и те, и другие изменения имеют общий солнечный источник. В следующие полгода

Таблица 1. Среднесуточные значения скорости СВ (V , км/с), модуля ММП (B , нТл) и величины модуляции КЛ жесткостью 10 ГВ ($A0$) в рассматриваемые периоды

Параметр	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение
01.03.2014—31.08.2014			
B , нТл	26	1.1	5.4 ± 0.04
V , км/с	678	253	369 ± 0.9
$A0$, %	−4.7	−12.4	-7.3 ± 0.03
01.09.2014—28.02.2015			
B , нТл	31.7	0.9	7.2 ± 0.05
V , км/с	766	281	426 ± 1.2
$A0$, %	−4.0	−14.5	-8.5 ± 0.03

после аномального периода значения также остаются несколько повышенными.

5. ОСОБЕННОСТИ ВАРИАЦИЙ КЛ И МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Очевидно, что описанное выше изменение параметров СВ и ММП должно было отразиться на модуляции потоков КЛ. Ведь в той части межпланетных возмущений, которая возникает при взаимодействии разноскоростных потоков СВ (*Corotating interaction region* — CIR), величина турбулентного магнитного поля определяется именно разностью величин скоростей и полей в сравнении с фоновыми значениями. Поскольку и то, и другое возросло в изучаемый период, следует ожидать возросшую эффективность межпланетных возмущений в отношении модуляции КЛ. В первую очередь это скажется на усилении магнитных барьеров в CIR, которые препятствуют входу КЛ во внутреннюю часть гелиосферы. Однако и ФЭ,

обусловленные корональными выбросами масс (КВМ), могут стать глубже по этой же причине, ведь КВМ по мере распространения аналогичным образом создают перед собой область сжатия (*Sheath*). Отметим, что под ФЭ мы понимаем изменение плотности и анизотропии потока КЛ под воздействием различных крупномасштабных возмущений солнечного ветра [Belov, 2008].

Рассмотрим величины общей модуляции потока КЛ (частиц с жесткостью 10 ГВ), данные по которым получены по мировой сети НМ (NMDB, <http://www01.nmdb.eu/>) и обработаны с использованием метода глобальной съемки [Белов и др., 2018] в исследуемый период и предыдущие полгода (см. табл. 1, $A0$). Можно видеть, что средняя величина модуляции потока КЛ увеличилась на $1.2 \pm 0.03\%$. Кроме того, если обратиться к сглаженным с 27-дневным усреднением данным по вариациям КЛ за период с 2012 по 2017 гг. (см. рис. 1), хорошо видно, что сентябре 2014 г. — феврале 2015 г. вариации имеют квазирекуррентный характер и значительную амплитуду, являются наибольшими на всем приведенном временном отрезке и, вообще говоря, представляют собой период максимальной модуляции КЛ во всем 24-м цикле солнечной активности. Обычно амплитуда 27-дневной вариации нейтронной компоненты КЛ (по данным НМ на уровне моря) не превышает ~ 0.7 — 1.0% от спокойного уровня [Дорман, 1963 и последующие исследования], а в этом случае амплитуды достигают нескольких процентов.

На основе суточных данных по вариациям КЛ (см. рис. 5, верхняя панель) нами были определены дни регистрации максимума и минимума плотности КЛ (дата $A0_{\max}$ и дата $A0_{\min}$), соответствующие величины вариаций в эти дни ($A0_{\max}$ и $A0_{\min}$ в %), разница между максимальной и минимальной вариацией ($dA0$, %), а также длительности периодов между ними и средние значения. Для удобства вся информация сведена в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики вариаций КЛ (для частиц с жесткостью 10 ГВ) в исследуемый период

Дата $A0_{\min}$	$A0_{\min}$, %	Дата $A0_{\max}$	$A0_{\max}$, %	$dA0$, %	dt min, дни	dt max, дни
13.08.2014	−7.3	26.08.2014	−5.1	2.2		
14.09.2014	−12.9	22.09.2014	−4.3	8.6	32	27
05.10.2014	−8.6	18.10.2014	−4.8	3.8	21	26
10.11.2014	−11.8	21.11.2014	−5.3	6.5	36	34
05.12.2014	−12	17.12.2014	−5.6	6.4	25	26
24.12.2014	−13.7	15.01.2015	−6.1	7.6	19	29
02.02.2015	−10.5	13.02.2015	−7	3.5	40	29
02.03.2015	−9.6	10.03.2015	−8.3	1.3	28	25
Среднее значение					28.71	28.0

Усредненные значения длительности периодов между соседними максимумами $dt_{\max}$ (и минимумами $dt_{\min}$) плотности КЛ очень близки к 27 дням и составили 28.71 и 28 сут соответственно. Однако более детальный анализ показывает, что существует период, значительно отличающийся от квазидвадцатисемидневной повторяемости: в октябре–ноябре период между максимумами плотности КЛ оказался длиннее почти на неделю и составил 34 сут. По-видимому, так проявился тот самый фазовый сбой (перестройка магнитного поля на Солнце, которая описана выше). Также стоит отметить, что длительность периодов между минимумами в большей степени изменчивы, чем периоды между максимумами. Вероятно, это связано с дополнительным воздействием спорадических событий. Действительно, самые глубокие понижения плотности КЛ ($< -10\%$) связаны с регистрацией у Земли (в ближайшие 2–3 дня от указанной в таблице даты минимума) значительных ФЭ величиной $> 2\%$, вызванных преимущественно воздействием КВМ или пары КВМ и высокоскоростного потока (ВСП) из КД [Шлык и др., 2021; Shlyk et al., 2022]. Более подробно о них будет сказано ниже.

Кроме того, проведенный анализ данных за 2014–2015 гг. показал, что при положительных значениях экваториальной составляющей ММП (B_x) (отрицательная полярность) модуляция КЛ больше. А самые высокие потоки КЛ наблюдаются, наоборот, при отрицательных значениях B_x (положительная полярность). Это правило “работает” во все рассмотренные периоды: все минимумы плотности КЛ, приведенные в табл. 2, попадают на отрицательный сектор ММП, а максимумы — на положительный, но различие усиливается в исследуемый нами особый период.

На рис. 12 показана зависимость величины модуляции потока КЛ ($A_0, \%$) от знака экваториальной

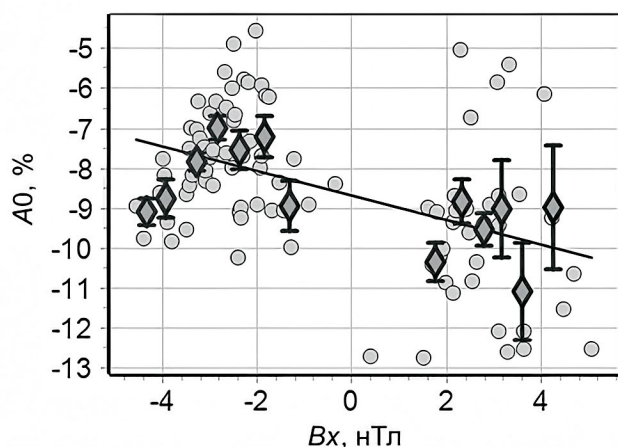


Рис. 12. Связь величины модуляции потока КЛ ($A_0, \%$) от знака экваториальной составляющей ММП (B_x , нТл) для периода сентябрь 2014 г. — февраль 2015 г.

составляющей ММП (B_x) для сентября 2014 г. — февраля 2015 г. для спокойного СВ (скорость < 800 км/с и модуль ММП < 7 нТл). Наглядно видно разделение на два облака точек, при этом такая явно выраженная связь отсутствовала до сентября 2014 г.

Выявленная связь модуляции с полярностью существует в спокойном СВ, она создает рекуррентность поведения КЛ в спокойные периоды, что хорошо видно в дни, близкие к максимальным значениям плотности КЛ в каждом обороте изучаемого периода. Вместе с тем, вблизи минимумов очевидно воздействие на КЛ выбросов солнечного вещества, создающих значительные Форбуш-эффекты.

На 2014 г. пришелся формальный максимум активности 24-го солнечного цикла, и хотя активность Солнца вблизи этого максимума была ниже обычной для подобных периодов [Безродных и др., 2019; Белов и др., 2023], но все же была заметной и существенной. В частности, в 2014 г. было много широких и быстрых КВМ, в том числе в рассматриваемом отрезке времени.

КВМ типа гало, зарегистрированные 1 сентября 2014 г. в 11:12 и 22:24 UT, выделяются даже среди других мощных КВМ, их начальные скорости составили 1901 и 1404 км/с соответственно (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). Эти КВМ, предположительно, были выброшены из зоны активных областей, которые в это время находилась в $\approx 20\text{--}30^\circ$ за восточным лимбом (рис. 13),

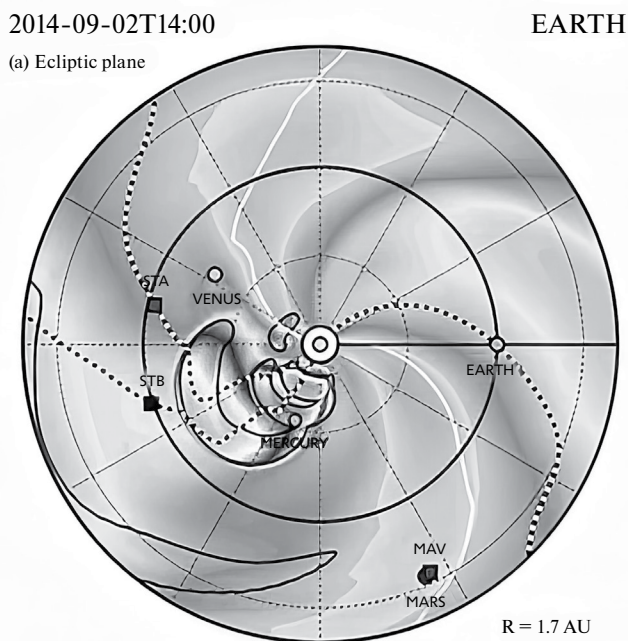


Рис. 13. Скриншот модели распространения нескольких КВМ (по данным <http://helioweather.net>) в начале сентября 2014 г. Белой линией показано положение гелиосферного токового слоя, черными линиями — границы КВМ.

а позднее получили номера 12157 и 12158 (на близких долготах наблюдались две АО в Северном и Южном полушариях одновременно).

На рис. 13 эти два выброса уже слились в одно межпланетное возмущение, приближающееся к орбите Земли.

Ускорительные и модуляционные способности выбросов тесно связаны [Belov et al., 2022]. По-видимому, с выбросами 1 сентября было связано значительное протонное возрастание, зарегистрированное спустя несколько часов на спутниках GOES, и продолжавшееся необычно долго. Поток протонов с энергией >10 МэВ достиг максимума (≈ 8 частиц $\text{ср}^{-1} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) только через ≈ 140 ч. Даже поток протонов >100 МэВ возрастал до максимума (≈ 0.6 частиц $\text{ср}^{-1} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) больше суток. Стоит отметить, что протонные возрастания от источников с такими гелиодолготами (E120) обычно вообще не регистрируются у Земли [Белов, 2017]. К сожалению, в зоне максимальной благоприятности не было измерений, но согласно модели (рис. 12) выброс должен был быть зарегистрирован на космических аппаратах STEREO. И действительно, в середине суток 1 сентября 2014 г. во всех энергетических каналах STEREO A и B (включая самые высокоэнергичные — 30—100 МэВ) наблюдались возрастания потоков протонов > 20 частиц $\text{ср}^{-1} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

В последующие дни сентября вышеупомянутые АО произвели еще несколько мощных вспышек и быстрых КВМ, часть из которых видна на рис. 12. Более поздние КВМ вызвали значительные ФЭ у Земли. Так, согласно базе данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID, <https://tools.izmiran.ru/feid>), созданной и поддерживаемой в ИЗМИРАН, 11 и 12 сентября 2014 г. были зарегистрированы ФЭ величиной 2.1 и 5.9% соответственно, вызванные КВМ, ассоциированными со вспышками в АО 12158. Даты этих ФЭ хорошо совпадают с первым минимумом, указанным в табл. 2.

В следующем обороте значительной дополнительной модуляции КЛ не наблюдалось. Хотя следует отметить, что именно в этот период на солнечном диске существовала АО необычайно большой площади (АО 12192, ~ 4300 миллионных долей солнечного полушария), производившая серии замкнутых (неэруптивных) вспышек M- и X-классов, описанию которых посвящено немало работ (например, [Thalmann et al., 2015; Chen et al., 2015; Korsos et al., 2018] и др.). Казалось бы, такая АО могла внести существенный вклад в рекуррентность, однако, все эти вспышки не привели к выбросам корональной массы (возможно, из-за слишком сильных магнитных полей), поэтому дополнительных понижений потока КЛ в последствии воздействия КВМ не было зарегистрировано.

Далее, 10 и 11 ноября 2014 г. зарегистрированы ФЭ с величинами 3.6 и 2.2%. Первый из них связан с воздействием ассоциированного со вспышкой КВМ из АО12205 (которая судя по местоположению с учетом двух солнечных оборотов может быть бывшей АО12158), а второй — с ВСП из южной корональной дыры, которая оказалась более геоэффективной благодаря наличию перед ней КВМ [Шлык и др., 2021; Shlyk et al., 2022]. Эти даты удовлетворяют положению ноябрьского минимума квазидвадцатисемидневной вариации (см. табл. 2).

На декабрь 2014 г. попадает два больших понижения в изотропной части вариаций КЛ в первой и третьей декаде месяца (см. рис. 5 и табл. 2). Отметим, что 1 и 3 декабря были зарегистрированы ФЭ величиной 3.4 и 2.1%, а в период 21—23 декабря — три ФЭ подряд с величинами 6, 2 и 2.7% соответственно. Первые два из упомянутых ФЭ, по-видимому, обусловлены совместным влиянием ВСП из южной полярной КД и КВМ от 28—29 ноября на юго-востоке в АО 12222 (которая по расположению на солнечном диске вполне может являться рекуррентной для вышеупомянутой АО 12157). ФЭ 21—23 декабря связаны также с воздействием КВМ (от 17 и 18 декабря в АО 12241 и 20 декабря в АО 12242, соответственно) при наличии дополнительного влияния ВСП из КД с отрицательной полярностью, которая также проходила центральный меридиан в указанные даты.

В рассматриваемый период на Солнце существовали несколько трансэкваториальных КД, а также полярные КД значительной площади (о которых уже упоминалось выше). По ссылке (http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2023/CH_and_HSS_2014_15.pdf) приведены сведения о различных характеристиках КД и соответствующих ВСП в период с августа 2014 г. по февраль 2015 г. (информация взята с сайтов https://solen.info/solar/coronal_holes.html и <https://www.solarmonitor.org/>, а также из базы данных FEID <https://tools.izmiran.ru/feid>).

Проведенный анализ показывает, что весь рассматриваемый период можно условно разделить на две части: 1-й период — с августа по октябрь 2014 г.; 2-й период — с ноября 2014 г. по февраль 2015 г. В первом периоде преобладало воздействие КД Северного полушария (с положительной полярностью), а во втором периоде ситуация стала обратной, и более геоэффективными оказались ВСП из КД Южного полушария (с отрицательной полярностью). При этом в периоде 1 наблюдаемые КД отрицательной полярности имели значительно меньшие площади и, соответственно, более короткие интервалы воздействия на околоземное пространство, чем преобладающие КД положительной полярности. В начале периода 2 (ноябрь—декабрь 2014 г.) площади КД разных полярностей

сравнимы, а к концу периода на первый план выступают КД отрицательной полярности.

Ранее уже упоминалось, что самые глубокие понижения плотности КЛ в ноябре–декабре 2014 г. совпали со значительными ФЭ, вызванными совместным влиянием КВМ и ВСП из южной полярной КД. Однако южная полярная КД имела значительную площадь и поле и в более позднее время (январь — февраль 2015 г., см. http://spaceweather.izmiran.ru/papers/2023/CH_and_HSS_2014_15.pdf). При этом быстрых КВМ, направленных в сторону Земли, в этот период не случалось, поэтому такой же значительной модуляции потока галактических КЛ не наблюдалось. В работе Altukhov et al. [1977] указывается, что воздействие ВСП из КД в отсутствие ударных волн (которые чаще создаются КВМ) отражается скорее не на провалах, а на пиках 27-дневной зависимости в модуляции КЛ. Авторы объясняют это тем фактом, что внутри ВСП существует гомогенная среда, способствующая более легкому распространению частиц КЛ вдоль силовых линий.

Следует заключить, что особенности модуляции КЛ в конце 2014 и начале 2015 гг. обусловлены объединением рекуррентных и спорадических явлений. Рекуррентность, в первую очередь, была связана с большими корональными дырами, особенно с южной полярной КД. Однако сами по себе КД не могли создать обсуждаемые вариации КЛ, ведь даже самые большие и самые высокоскоростные КД не создают больших Форбуш-эффектов. Достаточно вспомнить огромные долгоживущие трансэкваториальные КД 2003 г., максимальный ФЭ от которых не превысил 1.4% (согласно базе данных FEID). ФЭ от КД создается в области ее взаимодействия (CIR), а в самом ВСП обычно наблюдается восстановление интенсивности КЛ.

Но также сложно объяснить дополнительную модуляцию КЛ только лишь одной магнитной ловушкой, возникающей при распространении КВМ в межпланетном пространстве. Трудности в обеспечении долгого существования такой ловушки даже не самое главное. Основная проблема в том, что стабильные ловушки практически не влияют на высокоэнергичные КЛ. Для их эффективной модуляции нужны расширяющиеся ловушки ([Laster et al., 1962; Munakata et al., 2006; Dumbović et al., 2018] и ссылки в них), а поскольку при расширении эффективность ловушки уменьшается, нужны многочисленные возобновляемые ловушки. Именно такую ситуацию мы получили в конце 2014 г., когда по широкому ВСП распространялась серия выбросов солнечного вещества. Они затрудняли продольное распространение КЛ, а поскольку поперечное распространение в регулярных полях ВСП всегда затруднено, за выбросами создавались расширяющиеся квазиловушки, в которых КЛ замедлялись и уменьшали свою плотность. Это

привело и к общей дополнительной модуляции КЛ, и к ее неравномерному распределению по долготе.

6. ВЫВОДЫ

В сентябре 2014 г. — феврале 2015 г. вариации КЛ у Земли внутри солнечных оборотов резко возросли, что свидетельствует об усилении гелиодолготной асимметрии в распределении КЛ во внутренней гелиосфере, которая выражалась в дополнительной модуляции КЛ в секторах ММП с отрицательной полярностью ($B_x > 0$). Средняя плотность КЛ заметно снизилась и была самой низкой в 24-м цикле солнечной активности, что может быть объяснено изменением параметров СВ во внутренней части гелиомагнитосферы. Солнечный ветер у Земли в это время характеризовался существенно повышенной средней скоростью и усиленной напряженностью ММП.

Особый период в поведении КЛ наблюдался после переполюсовки и совпал со временем максимального усиления экваториального диполя солнечного магнитного поля. А в магнитном поле на поверхности солнечного источника наблюдалась хорошо выраженная двухсекторная структура с аномально сильным полем в обоих секторах.

Внутри особого периода следует выделить два временных интервала, имеющих различные характеристики. В первом из них (сентябрь — октябрь 2014 г.) выражен эффект более высоких гармоник солнечного магнитного поля (начиная с квадруполь), связанный с существованием на протяжении нескольких оборотов комплекса активности на определенной гелиодолготе, на фоне воздействия северной полярной корональной дыры (положительной полярности). Начало этого периода совпало с очень быстрыми и мощными КВМ из области за восточным солнечным лимбом, произошедшими 1 сентября 2014 г. Эти КВМ стали первыми из серии выбросов из этой долготной зоны, которые и внесли вклад в дополнительную модуляцию КЛ в отрицательном секторе ММП.

Второй интервал (ноябрь–декабрь 2014 г.) связан также не только с воздействием КВМ, но и очень значительным вкладом южной полярной корональной дыры (отрицательной полярности), который обеспечивался мощным экваториальным диполем, существовавшим на Солнце в это время. Январь и февраль 2015 г. соответствуют периоду постепенного разрушения создавшейся долготной асимметрии: величина экваториального диполя (и, соответственно, эффективность воздействия потока из южной КД) падает, и вместе с тем, разрушается комплекс активности, существовавший в предыдущих оборотах.

Таким образом, можно утверждать, что наряду с усилением постоянно существующих рекуррентных вариаций КЛ из-за воздействия аномально

возросшего экваториального диполя и больших КД, причиной увеличения амплитуд квазидвадцатисемидневной вариации в сентябре 2014 — феврале 2015 г. стало наложение ряда спорадических явлений, вызванных образованием области “активных долгот” на Солнце, продуцировавших значительные вспышки и быстрые выбросы на протяжении нескольких солнечных оборотов. Такие следующие друг за другом примерно в одном направлении выбросы корональной массы привели к образованию в межпланетном пространстве возобновляемых расширяющихся магнитных ловушек, повлиявших на усиление модуляции КЛ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта статья является продолжением работы Ерошенко Евгении Александровны и посвящается ее светлой памяти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алания М.В., Шаташвили Л.Х. Квазипериодические вариации космических лучей. Тбилиси: Мецниереба, 1974. 136 с.
- Базилевская Г.А., Охлопков В.П., Чарахчян Т.Н. Исследования 27-дневных вариаций космических лучей и их связи с неравномерным распределением активных областей на Солнце // Труды ФИАН. 1976. Т. 88. С. 94—113.
- Безродных И.П., Морозова Е.И., Петрукович А.А., Кожухов М.А. Динамика солнечной и геомагнитной активности. III. Солнечная и геомагнитная активность в 24 цикле. Реконструкция динамики солнечной и геомагнитной активности // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2019. Т. 172. № 5. С. 10—24.
- Белов А.В. Вспышки, выбросы, протонные события // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 6. С. 783—793.
<https://doi.org/10.7868/S0016794017060025>
- Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г., Оленева В.А., Абунина М.А., Абуни А.А. Метод глобальной съемки для мировой сети нейтронных мониторов // Геомагнетизм и аэрономия. 2018. Т. 58. № 3. С. 374—389.
<https://doi.org/10.7868/S0016794018030082>
- Белов А.В., Белова Е.А., Шлык Н.С., Абунина М.А., Абуни А.А. Геоэффективность спорадических явлений в 24 солнечном цикле // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63. № 4. С. 534—544.
<https://doi.org/10.31857/S0016794023600291>
- Дорман Л.И. Вариации космических лучей и исследование космоса. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 1028 с.
- Дорман Л.И., Фейнберг Е.Л. Вариации космических лучей // Успехи физических наук. 1956. Т. 59. № 2. С. 189—228.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0059.195606a.0189>
- Ишков В.Н. 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>
- Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д., Харшиладзе А.Ф. Расчеты межпланетного магнитного поля по данным о его величине в фотосфере солнца // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46. № 3. С. 310—319.
- Пишкало Н.И., Лейко У.М. Динамика околополярного магнитного поля Солнца в максимуме 24-го цикла // Кинематика и физика небесных тел. 2016. Т. 32. № 2. С. 37—47.
- Сдобнов В.Е., Кравцова М.В., Олемской С.В. Модуляционное влияние коротярующей магнитной ловушки на 27-дневные вариации космических лучей в ноябре — декабре 2014 г. // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 1. С. 13—16.
<https://doi.org/10.12737/szf-51201902>
- Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Абуни А.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Влияние взаимодействующих возмущений солнечного ветра на вариации галактических космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 6. С. 694—703.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021060134>
- Altukhov A.M., Okhlopov V.P., Charakhchyan T.N., Bazilevskaya G.A. The relationship between high speed solar wind streams and 27-day cosmic ray variation / Proc. 15th ICRC. Plovdiv, Bulgaria, August 13—26, 1977. V. 3. P. 247—251.
- Belov A.V. Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Universal Heliophysical Processes: proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium. 2008. V. 4. Symp. S257. P. 439—450.
<https://doi.org/10.1017/S1743921309029676>
- Belov A.V., Shlyk N.S., Abunina M.A., Belova E.A., Abunin A.A., Papaioannou A. Solar energetic particle events and Forbush decreases driven by the same solar sources // Universe. 2022. V. 8. № 8. ID403.
<https://doi.org/10.3390/universe8080403>
- Broxon J.W. Recurrence phenomena in cosmic-ray intensity // Phys. Rev. 1941. V. 59. № 10. P. 773—776.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.59.773>
- Chen H., Zhang J., Ma S., Yang S., Li L., Huang X., Xiao J. Confined flares in solar active region 12192 from 2014 October 18 to 29 // Astrophys. J. Lett. 2015. V. 808. № 1. ID L24.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/808/1/L24>
- Gil A., Mursula K. Exceptionally strong variation of galactic cosmic ray intensity at solar rotation period after the maximum of solar cycle 24 // Proc. 34th ICRC, Hague, Netherlands, July 30 — August 6, 2015. V. 236. ID149.
<https://doi.org/10.22323/1.236.0149>
- Gil A., Alania M.V. Energy spectrum of the recurrent variation of galactic cosmic rays during the solar minimum of cycles 23/24 // Solar Phys. 2016. V. 291. № 6. P. 1877—1886.
<https://doi.org/10.1007/s11207-016-0924-z>

- Dumbović M., Heber B., Vršnak B., Temmer M., Kirin A. An analytical diffusion–expansion model for Forbush decreases caused by flux ropes // *Astrophys. J.* V. 860. № 1. ID71. 2018. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac2de>
- Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F., et al. Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover // *Science*. V. 343. № 6169. ID1244797. 2014. <https://doi.org/10.1126/science.1244797>
- Karna N., Hess Webber S.A., Pesnell W.D. Using polar coronal hole area measurements to determine the solar polar magnetic field reversal in solar cycle 24 // *Solar Phys.* V. 289. № 9. P. 3381–3390. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11207-014-0541-7>
- Korsos M.B., Ruderman M.S., Erdelyi R. An application of the weighted horizontal magnetic gradient to solar compact and eruptive events // *Adv. Space Res.* V. 61. № 2. P. 595–602. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.023>
- Laster H., Lenchek A.M., Singer S.F. Forbush decreases produced by diffusive deceleration mechanism in interplanetary space // *J. Geophys. Res.* V. 67. № 7. P. 2639–2643. 1962. <https://doi.org/10.1029/JZ067i007p02639>
- Munakata K., Yasue S., Kato C., Kota J., Tokumaru M., Kojima M., Darwish A.A., Kuwabara T., Bieber J.W. On the cross-field diffusion of galactic cosmic rays into an ICME // *Advances in Geosciences*. V. 2. Solar Terrestrial. Ed. Marc Duldig. Singapore: World Scientific Publishing Co, 2006. P. 115–124. https://doi.org/10.1142/9789812707185_0009
- Modzelewska R., Alania M.V. The 27-day cosmic ray intensity variations during solar minimum 23/24 // *Solar Phys.* V. 286. № 2. P. 593–607. 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0261-4>
- Monk A.T., Compton A.H. Recurrence phenomena in cosmic-ray intensity // *Rev. Mod. Phys.* V. 11. № 3–4. P. 173–179. 1939. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.11.173>
- Mordvinov A.V., Yazev S.A. Reversals of the Sun's polar magnetic fields in relation to activity complexes and coronal holes // *Solar Phys.* V. 289. № 6. P. 1971–1981. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0456-8>
- Obridko V.N., Pipin V.V., Sokoloff D., Shibalo A.S. Solar large-scale magnetic field and cycle patterns in solar dynamo // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* V. 504. № 4. P. 4990–5000. 2021. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1062>
- Petrie G.J.D., Petrovay K., Schatten K. Solar polar fields and the 22-year activity cycle: observations and models // *Space Sci. Rev.* V. 186. № 1–4. P. 325–357. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0064-4>
- Thalmann J.K., Su Y., Temmer M., Veronig A.M. The confined X-class flares of solar active region 2192 // *Astrophys. J. Lett.* V. 801. № 2. ID L23. 2015. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/801/2/L23>
- Sheeley Jr. N.R., Wang Y.-M. The recent rejuvenation of the Sun's large-scale magnetic field: a clue for understanding past and future sunspot cycles // *Astrophys. J.* V. 809. № 2. ID113. 2015. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/809/2/113>
- Shlyk N.S., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A., Ole-neva V.A., Yanke V.G. Forbush decreases caused by paired interacting solar wind disturbances // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* V. 511. № 4. P. 5897–5908. 2022. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac478>
- Sun X., Hoeksema J.T., Liu Ya., Zhao Ju. On polar magnetic field reversal and surface flux transport during solar cycle 24 // *Astrophys. J.* V. 798. № 2. ID114. 2015. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/798/2/114>
- Svalgaard L., Kamide Y. Asymmetric solar polar field reversals // *Astrophys. J.* V. 763. № 1. ID23. 2013. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/763/1/23>
- Vallarta M.S., Godart O. A theory of world-wide periodic variations of the intensity of cosmic radiation // *Rev. Mod. Phys.* V. 11. № 3–4. P. 180–189. 1939. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.11.180>

Anomalous Quasi-Recurrent Variations of Cosmic Rays in September 2014 – February 2015

N. S. Shlyk¹, *, A. V. Belov¹, V. N. Obridko¹, M. A. Abunina¹, A. A. Abunin¹

¹ Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

*e-mail: nshlyk@izmiran.ru

An abnormal behavior of galactic cosmic rays in September 2014 – February 2015, manifested in a significant modulation of its flux with a period close to solar rotation, is studied. The state of the solar magnetic field, changes in the parameters of the solar wind and interplanetary magnetic field during the specified period are analyzed. The reasons for the occurrence of longitudinal asymmetry in the distribution of galactic cosmic rays in the inner heliosphere are discussed. It has been established that the period under study is divided into two parts with different physical conditions on the Sun. Conclusions have been drawn about the decisive joint influence of sporadic and recurrent events: repeatedly renewable “magnetic traps” created by successive coronal mass ejections from the same longitudinal zone and anomalously expanded polar coronal holes with an enhanced magnetic field.