

УДК 524.1-352

О ВАРИАЦИЯХ ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В КОНЦЕ 24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. Ю. В. Балабин^{1,*}, А. В. Белов², Р. Т. Гущина², В. Г. Янке², И. В. Янковский³

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Кабардино-Балкарский государственный университет имени Х.М. Бербекова”, Нальчик, Россия

*E-mail: balabin@pgia.ru

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 20.10.2020 г.

Принята к публикации 27.11.2020 г.

Данные большинства нейтронных мониторов показывают, что интенсивность космических лучей еще не достигла уровня, наблюдавшегося на этих станциях в 2009 г. Однако на ряде станций (Баренцбург, Туле, Кергелен, Москва и др.) интенсивность уже превысила уровень 2009 г. Возможно, этот аномальный эффект связан с необычным поведением характеристик солнечной активности в 24 цикле.

DOI: 10.31857/S0367676521030030

ВВЕДЕНИЕ

В потоке космических лучей, регистрируемых на Земле, наблюдается квазиодиннадцатилетняя вариация в противофазе с солнечной активностью. Связано это с тем, что космические лучи в интервале энергий 1–100 ГВ подвергаются солнечной модуляции в гелиосфере. Во время предыдущего глубокого минимума солнечной активности (в 2009 г.) наблюдался самый высокий поток космических лучей за все время регистрации на земле и околоземном пространстве. В 2019 году солнечная активность приближается к своему минимуму снова. Поток галактических космических лучей, попадая на Землю, проходит через атмосферу и магнитосферу, где интенсивность космических лучей разделяется и фильтруется по энергии, под воздействием атмосферы и магнитосферы возникают вариации космических лучей магнитосферного и атмосферного происхождения, но наиболее сильно поток меняется с 11-летним циклом солнечной активности. При этом амплитуда вариаций космических лучей уменьшается с ростом энергии входящих частиц. Временные изменения одной из важных составляющих космической среды — потока галактических космических лучей — дают возможность описать состояние гелиосферы, спрогнозировать космическую погоду и взглянуть на ее

прошлое. Установленная Форбушем [1] более шестидесяти лет назад связь наблюдаемого потока КЛ с солнечной активностью подтверждена сегодня результатами многолетних наблюдений Солнца, гелиосферных характеристик и космических лучей на земле и в космосе.

Двадцать четвертый цикл солнечной активности оказался во многом необычным. К настоящему времени солнечная активность приблизилась к очередному минимуму, а 24 цикл к завершению. При этом прошлый минимум в 2009 г. был необычно глубоким, поток космических лучей превысил максимумы предыдущих циклов. По мере приближения к очередному минимуму СА на мировой сети нейтронных мониторов отмечен интересный эффект. Значимая часть станций нейтронных мониторов (НМ) или достигла, или превысила максимум 2009 г., тогда как на остальных станциях пока еще уровень 2009 г. не достигнут.

Анизотропия космических лучей, наблюдаемая нейтронными мониторами, не превышает единицы процентов. Она связана с динамическими явлениями на Солнце и в межпланетном пространстве, а также с движением Земли [2]. В связи с суточным вращением Земли возникающая в потоке космических лучей анизотропия отмечается на большинстве НМ. В целом же поток космиче-

НАБЛЮДЕНИЯ

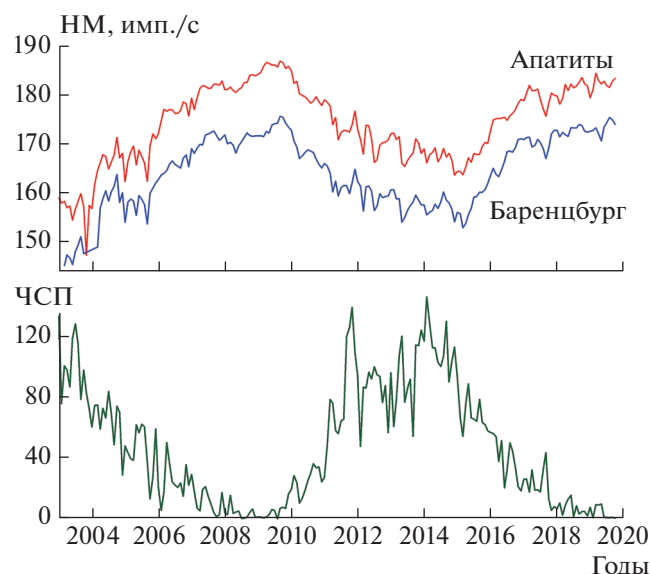


Рис. 1. Профили счета НМ в Апатитах и Баренцбурге за 2002–2020 гг. (вверху) и число солнечных пятен (ЧСП) как показатель солнечной активности (внизу). Используются среднемесячные значения.

ских лучей в высокой степени изотропен, особенно на больших масштабах времени (год и более). Темп счета на каждой станции определяется как глобальными факторами (жесткость геомагнитного или атмосферного обрезания, высота над уровнем моря и др.), так и локальными (эффективность счетчиков, настройки усилительного тракта). Поэтому для оценки глубины минимума солнечной активности имеет смысл сравнивать в первую очередь максимумы темпа счета на одной и той же станции. Именно для этих целей выполнено сравнение максимумов в космических лучах в 2009 и 2019 гг. на станциях Апатиты, Оулу, Киль и др. По данным этих станций максимум 2009 г. в космических лучах не достигнут. Однако, в Баренцбурге (и на ряде других станций, как позже выяснилось) данные показывают, что максимум 2009 г. достигнут или даже превзойден. Таким образом, один набор данных от станций НМ показывает, что текущий минимум солнечной активности оказался глубже, чем минимум 2009 г., а максимум космических лучей в текущем минимуме выше 2009 г. В случае другого набора станций НМ это не верно. При этом обе выборки станций многочисленны, включают НМ, располагающиеся как в высоких широтах, так и в низких, поэтому аппаратный эффект весьма маловероятен.

Появление устойчивого различия прохождения минимума солнечной активности на близких станциях Апатиты и Баренцбург привлекло внимание. На рис. 1 приведены потоки космических лучей по данным НМ в Апатитах и Баренцбурге и активность Солнца, измеряемая числом солнечных пятен на протяжении двух последних циклов солнечной активности. Используются данные за 2002–2020 гг. Как видим, солнечная активность и поток космических лучей изменяются в противофазе. Обращает на себя особенность: счет НМ в Баренцбурге к концу 2019 г. достиг пикового значения, отмеченного в предыдущем минимуме в 2009 г. В Апатитах уровень 2009 г. явно еще не достигнут. При этом обе станции являются высокоширотными российскими станциями: Апатиты находятся на широте 67.6° с.ш., Баренцбург на широте 78.2° с.ш. На обеих станциях действует атмосферное обрезание 1 ГВ, в то время как геомагнитное обрезание составляет ~ 0.6 и ~ 0 ГВ в Апатитах и Баренцбурге соответственно. Причем, как видно на рис. 1, различие не имеет характера одного случайного выброса данных, а носит систематический характер: на спаде солнечной активности около 2016 г. счет НМ в Баренцбурге начал расти быстрее, чем в Апатитах, и это продолжается до настоящего времени.

Были проанализированы профили счета многих станций мировой сети НМ. Используются базы данных NMDB [3] и ИЗМИРАНа [4]. Отбирались станции НМ, непрерывно работавшие в течение 23–24 циклов солнечной активности. Анализ данных мировой сети НМ показал, что различие носит глобальный характер и проявляется на целом ряде станций, как в высоких широтах, так и в низких. Всего около четверти от общего количества станций показали подобный аномальный эффект: темп счета на станциях НМ в 2019 г. сравнялся или даже превысил темп счета в минимуме 2009 г. При этом в число аномальных станций вошли такие НМ, как Москва (среднеширотная станция) и Германус (низкоширотная станция). Следовательно, аномальное увеличение счета является не локальным эффектом на отдельной станции, обусловленным какими-то внутренними процессами (например, постепенная потеря электронными компонентами усилительного тракта своих функциональных свойств), а общим для целого ряда станций, расположенных по всему земному шару.

Несмотря на хорошее усреднение (см. рис. 1) — использовано среднемесячное значение счета НМ — флуктуации потока космических лучей, вызванные изменениями солнечной активности, затрудняют выделение аномального эффекта на

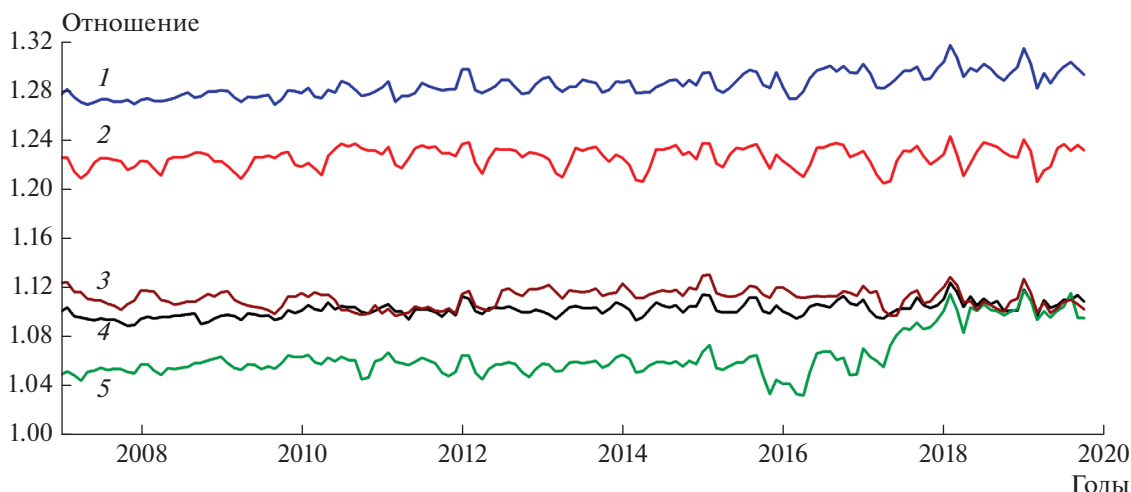


Рис. 2. Отношение счета некоторых станций к счету на станции Апатиты. Среднемесячные значения. 1 — Кергелен, 2 — Наин, 3 — Ньюарк, 4 — Инувик, 5 — Туле.

станциях. Кроме того, критерий “превышение уровня 2009 г.” является качественным признаком, но не количественным. Даже при взгляде на рис. 1, где представлены профили обычной станции (Апатиты) и аномальной (Баренцбург), различие не носит явного характера. Следовало бы разработать более надежный и наглядный метод выделения аномального поведения станции. Такой метод был найден: следует брать отношение счета на двух станциях, причем, одна из них выполняет роль базовой, в надежности данных которой имеется большая уверенность. В этом случае влияние солнечной активности частично будет компенсировано, особенно для полярных станций. В качестве эталона взята станция Апатиты. Во-первых, к ее данным имеется полный доступ, есть возможность работать с исходными данными. Во-вторых, надежность данных станции Апатиты проверена сравнением со станцией Оулу (Финляндия). С одной стороны, станция Оулу расположена недалеко от станции Апатиты, асимптотические конусы приема станций различаются не более чем на десять градусов в самых крайних случаях. В то же время — это разные станции, оснащенные совершенно разной электронной аппаратурой, имеют разное программное обеспечение, следовательно, вероятность синхронных аппаратурных эффектов ничтожна. Поэтому отношение счетов двух этих станций, если их данные корректны, должно быть стабильной величиной с малыми флуктуациями.

Предположение о стабильной работе станции Апатиты (и Оулу соответственно) подтвердилось. Отношение Оулу/Апатиты (взяты среднемесячные значения) на протяжении всего изучаемого периода (2002–2020) имеет постоянное значение

с очень небольшими флуктуациями. В паре Оулу–Апатиты влияние солнечной активности действительно сведено к минимуму, поскольку вариации счета НМ происходят синхронно. Однако, абсолютный счет на станциях различается значительно. Это связано со многими факторами: конструкцией и количеством счетчиков, высотой над уровнем моря, чувствительностью электронного тракта и др. Поэтому дополнительно в отношение станций вводился нормировочный множитель, приближающий значение к 1. Это сделано ради удобства представления и сравнения. Отработанная на паре станций Оулу–Апатиты методика определения отношений была затем использована для ряда других станций мировой сети НМ.

На рис. 2 приведены отношения счета некоторых НМ к счету НМ в Апатитах. Станции Наин, Инувик и Ньюарк показывают стабильность отношения счета к Апатитам, соответственно, профиль счета на этих станциях пропорционален профилю в Апатитах, следовательно, на этих станциях максимум 2009 г. не превышен. Интересно отметить, что метод отношений выявил вероятный “снежный эффект”: накопление снега на крыше здания, в котором находится НМ. На рис. 2 на графике отношений Наин/Апатиты отмечены периодические проседания счета на НМ в Наине, происходящие в начале каждого года. В здании НМ в Апатитах крыша имеет очень крутой скат, и снег в течение зимы не скапливается на ней, а сходит вскоре после снегопада.

В то же время метод отношений выявил аномальный эффект на НМ в Кергелене: отношение выросло с 2008 по 2019 гг. на ~3%. Это существенное изменение счета на НМ в Кергелене. На стан-

ции Кергелен аномальный дрейф отмечен на протяжении всего периода сравнения. На станции Туле он внезапно начинается в 2016 и к 2020 гг. возрастает на 6%! Для Баренцбурга отношение счета к Апатитам возрастает на 1%, начало роста отмечено также около 2016 г. Отношение Кергелен–Апатиты примечательно еще и ростом флуктуаций. Постепенный рост отношения счета к счету НМ в Апатитах отмечен на НМ в Москве, Якутске, Германусе (ЮАР). НМ на станции Певанук (Канада) показал явный рост до 2018 года, далее данные отсутствуют, поэтому эта станция в данной работе не приводится.

По отдельности изменение отношения счета какой-либо станции НМ к эталонной, в стабильной работе которой имеется крепкая уверенность, не вызывает удивления. Причиной многолетнего дрейфа может быть, как аппаратурный эффект, так и локальный (далее о нем будет сказано). Например, скачкообразное изменение отношения Туле–Апатиты в 2016–2018 гг. вполне может быть аппаратурным или локальным эффектом. Однако возникновение аппаратурного или локального эффекта сразу на десятке станций маловероятно, причем, в основном дрейф начинается в 2016 г. или около того.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. Различие скорости счета на станциях, достигнутое в конце 2019 г. по отношению к уровню в максимуме 2009 г., можно было бы объяснить неясным локальным дефектом на 1–2 станциях. Яркий пример – станция Туле. Расположена она в Гренландии, покрытой льдом. Сезонные вариации счета, связанные с накоплением снега и льда в месте, где расположена станция, отмечаются на бессвинцовых НМ, чувствительных к нейтронам меньших энергий (до 1 МэВ) [2]. Возможно, скачкообразный дрейф счета в Туле – следствие таяния ледников. Однако, общее число аномальных станций более десяти. Очень маловероятно, что на десятке станций, разбросанных по всему миру от Антарктики до Шпицбергена, оснащенных разными системами регистрации, проявятся аналогичные эффекты дрейфа.

2. Можно предположить, что различие в поведении профиля интенсивности космических лучей на полярных станциях объясняется северо-южной асимметрией. Или анизотропией между направлениями, близкими к плоскости эклиптики, и на полюса. Но в список аномальных станций входят Германус, Москва, конусы приема которых практически лежат в плоскости магнитного экватора, который незначительно отличается от географического.

3. Можно предположить, что эффект объясняется дрейфом магнитных полюсов Земли и изменениями жесткостей геомагнитного обрезания [5]. Однако, наиболее сильный эффект наблюдается на полярных станциях на обоих полюсах: там, где пороговой является жесткость атмосферного обрезания, а не геомагнитного. Кроме того, в [5] приведен обширный список станций НМ с данными по изменению жесткости геомагнитного обрезания. Станции НМ с большими изменениями как раз не входят в число аномальных.

4. Пространственная анизотропия КЛ по отношению к Солнцу не привела бы к такому эффекту, поскольку за счет суточного вращения Земли станции, расположенные на одной широте, будут за сутки сканировать примерно один и тот же конус (телесный угол). Москва и Киль находятся примерно на одной широте, асимптотические конусы приема у них похожи, располагаются с долготным сдвигом, но в Москве отмечен аномальный эффект, а в Киле – нет. Если же ось этой анизотропии располагается близко к оси мира, то такой аномальный эффект наблюдали бы только полярные станции, в то время как он также наблюдается в Москве и Германусе.

5. Обнаруженный эффект аномального дрейфа требует дальнейшего изучения, поскольку он ставит под некоторое сомнение изотропию космических лучей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные особенности достижения максимума космических лучей частицами разной энергии (на примере минимумов солнечной активности в 1976, 1996 и 2019 гг. [6, 7]) в настоящее время не позволяют сделать определенное заключение о восстановлении плотности космических лучей и о начале нового цикла в космических лучах. Можно только определенно сказать, что поток будет не ниже уровня 2009 г. По скользящим значениям чисел пятен W минимум солнечной активности в 24/25 наблюдался в 08.2019 г., но начало нового цикла в космических лучах происходит с учетом времени запаздывания космических лучей относительно солнечной активности при данном направлении гелиосферного поля. Обнаруженное различие в достижении максимума потока космических лучей на разных станциях НМ может иметь различные составляющие, как локального характера, так и глобального.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Forbush S.E.* // *J. Geophys. Res.* 1954. V. 59. P. 525.
2. *Дорман Л.И.* Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 402 с.

3. <http://www01.nmdb.eu/nest>.
4. <http://www.izmiran.ru>.
5. Гвоздевский Б.Б., Абунин А.А., Кобелев М.С. и др. // Геомагн. и аэроном. 2016. Т. 56. № 4. С. 411; Gvozdevskii B.B., Abunin A.A., Kobelev P.G. // Geomagn. Aeronomy. 2016. V. 56. No. 4. P. 381.
6. Гущина Р.Т., Белов А.В., Янке В.Г. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 577; Gushchina R.T., Belov A.V., Yanke V.G. // Bull. Rus. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 5. P. 513.
7. Dorman L.I., Gushchina R.T. // Proc. 15th ICRC. V. 3. (Plovdiv, 1977). P. 263.

On variations of the cosmic rays flow at the end of the 24th cycle of solar activity

Yu. V. Balabin^{a,*}, A. V. Belov^b, R. T. Gushchina^b, V. G. Yanke^b, I. V. Yankovsky^c

^a*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

^b*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Moscow 108840 Russia*

^c*Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik 360004 Russia*

*e-mail: balabin@pgia.ru

The data of most neutron monitors show that the intensity of cosmic rays has not yet reached the level observed at these stations in 2009. However, at a number of stations (Barentsburg, Tula, Kerguelen, Moscow, etc.), the intensity has already exceeded the level of 2009. Perhaps this anomalous effect is associated with the unusual behavior of the characteristics of solar activity in the 24th cycle.