

ГОДОВЫЕ ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 24-М СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

Ю.В. Балабин¹, А.В. Белов², Р.Т. Гушина²¹ Полярный геофизический институт РАН, Апатиты ² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, РАН

Абстракт. В данных мировой сети нейтронных мониторов (НМ) в 2011-13 гг. обнаружена годовая вариация космических лучей (КЛ) амплитудой $\geq 1\%$ и минимумом в летние месяцы. Она присутствует и в изменениях плотности КЛ, полученных методом глобальной съёмки. Выявленная аномальная вариация имеет внеземное происхождение, но не связана с изменениями гелиошироты Земли. Похожая, но меньшая, вариация была в 1973-76 гг. В тот же период наблюдаются квазигодовые вариации межпланетного магнитного поля (ММП) и параметров солнечного ветра, которые согласуются с вариациями КЛ.

Причинами годовых вариаций космических лучей (КЛ) являются: годовые изменения метеорологических факторов, годовые изменения солнечной активности (СА) и изменения пространственного положения Земли относительно Солнца и гелиоэквиатора [Дорман, 1957]. Исследование годовых вариаций КЛ Дорманом и др., [1969], показало, что оно позволяет получить связь гелиоширотного распределения СА с наблюдаемой на Земле интенсивностью КЛ. Крымский и др., [1981] при изучении эффектов взаимодействия гелиомагнитосферы с галактическим полем нашли гелиоширотный градиент плотности КЛ, связанный с асимметрией гелиосферы. Амплитуда выделенной здесь годовой вариации в КЛ в минимумах циклов СА не достигала 1% и объяснялась различием магнитного дрейфа частиц в зависимости от направления общего магнитного поля Солнца. Известно [Дорман, 1963], что годовая вариация может создаваться геометрическими факторами, например эллиптичностью земной орбиты. Однако перечисленные причины не способны создать большую годовую вариацию, что подтверждается многолетними наблюдениями. Поэтому нас заинтересовали признаки большой величины годовой вариации КЛ в 2011-2013 гг. [Balaabin et al., 2014]. Исследование этой аномалии особенно интересно в связи с необычностью последнего десятилетия. В рекордно глубоком последнем минимуме СА и во время фазы роста СА в 24-ом цикле выявлены особенности в изменении различных характеристик СА и гелиосферы по сравнению с соответствующими эпохами предшествующих циклов. Эти аномалии отражаются в долговременной модуляции КЛ [Гушина и др., 2014]. Не исключено, что те же аномалии приводят к созданию годовой волны в КЛ.

Данные и методы. При анализе данных станции Баренцбург была замечена годовая вариация космических лучей (ГВ КЛ) в данных нейтронного монитора. Это побудило провести более тщательное исследование, применить метод наложения эпох с целью выделения и подробного изучения этой вариации. Оно показало, что на протяжении 2011-13 гг. ГВ КЛ действительно присутствует и составляет около 2%. После этого осуществлен поиск подобной вариации в данных других станций нейтронных мониторов. Были собраны данные более чем 40 станций с различными пороговыми жесткостями, начиная от низкоширотных станций (Цумеб) и заканчивая полярными станциями в Арктике и Антарктике, в период от последнего минимума солнечной активности до настоящего времени, т.е. 2007-2013 гг.. Станции были разбиты на 5 групп: низкоширотные ($R_c \geq 7$ ГВ), среднеширотные ($R_c \geq 4$ ГВ), высокоширотные ($R_c \geq 2$ ГВ) и приполярные ($R_c \leq 2$ ГВ) с разделением на северное и южное полушарие. Дополнительно анализировались данные о межпланетной среде и межпланетном магнитном поле. Применялся скользящий метод наложения эпох, когда "окно", в пределах которого метод применяется, смещается с шагом в 1 год по всему ряду данных. В дополнение к данным отдельных нейтронных мониторов использованы среднемесячные вариации плотности КЛ, полученные в результате обработки данных всей сети нейтронных мониторов и других детекторов [Белов и др., 1993].

Вариации КЛ. Метод наложения эпох выявляет ГВ КЛ в период 2011-13. ГВ КЛ присутствует и имеет оду и ту же фазу практически на всех станциях. Минимум вариации приходится на середину года. Примеры ГВ КЛ даны на рис.1-3 для станций противоположных групп: низкоширотных и приполярных. Рис.1а показывает синхронность и одинаковость амплитуд ГВ КЛ на 8 низкоширотных станциях, рис.1b демонстрирует это же для 11 северных высокоширотных станций. На рис.2 и 3 кроме ГВ КЛ в 2011-13 для сравнения показаны годовые вариации на трех выбранных станциях в контрольный период 2007-09. По рис.4 можно сделать оценку амплитуды вариации по группам станций. На низкоширотных станциях амплитуда ГВ КЛ составляет примерно 1.2%, на среднеширотных – 1.7%, на полярных – около 2.2%. Наблюдается она и на высокогорных станциях, и на уровне моря. Затем скользящий метод наложения эпох был применен к более длинному ряду данных некоторых станций НМ: Апатиты, Оулу, Мак-Мердо, Ньюарк и Туле. Отметим, что в периоды максимума солнечной активности (СА) многочисленные Форбуш-понижения искажают результат и такой анализ теряет смысл. Найденная нами ГВ КЛ имеет минимум в середине года, а максимум – в начале и в конце года, на март и сентябрь приходятся фазы спада и роста соответственно. Эта ГВ КЛ существует достаточно долго и приходится не на минимум, а на фазу роста СА (2011-13).

Внеземное происхождение исследуемого эффекта становится ещё более очевидным, если рассмотреть вариацию плотности КЛ за пределами магнитосферы, полученную методом глобальной съёмки. В данной работе мы использовали долговременную вариацию для КЛ с жесткостью 10 ГВ, полученную на основе данных всей сети наземных наблюдений КЛ (~40 НМ) и результатов зондирования стратосферы [Стожков и др., 2007]. На рис.5, нижняя кривая – (усредненные годовые вариации А10У для спокойного состояния гелиосферы – из всего периода 1958-2010 гг были исключены годы высокой солнечной активности, а верхняя - А10У для 2011-2013. Видно, что до последних лет средняя годовая волна А10У практически отсутствует, а в начале 24-ого цикла (2011-2013 гг) размах вариаций внутри года достигает ~3% (минимум - летом, максимум – зимой). В поведении А10У в 2011-2013 гг. выделяется минимум в июне и июле. И можно спросить, не является ли этот минимум результатом наложения значительных Форбуш-понижений, случайно пришедшихся на летний период. По-видимому, это не так. В эти годы было мало больших ФП, только 5 из них имели величину >5% (для 10 ГВ). Из этих 5 событий – четыре пришлось на февраль-апрель, а два на март. В марте 2012 г. наблюдалось самое пока большое (>11% для 10 ГВ) Форбуш-понижение текущего цикла. Именно Форбуш-понижения объясняют локальный минимум на кривой в марте. Летний же минимум, скорее, следствие долгопериодных вариаций.

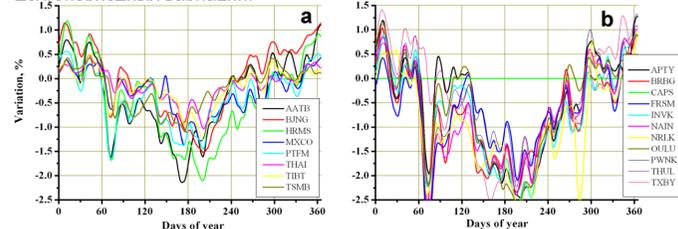


Рис.1 Годовая вариация на низкоширотных (а) и приполярных (б) станциях в 2011-13.

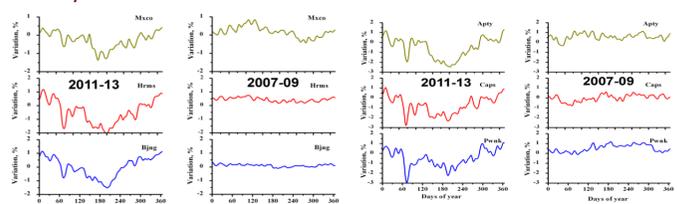


Рис.2 Слева профили ГВ на низкоширотных станциях Мехико, Германия, Пекин в 2011-2013. Справа – то же для 2007-09.



Рис.3 Слева профили ГВ на полярных станциях Апатиты, м. Шмидта, Певанук в 2011-2013. Справа – то же для 2007-09.

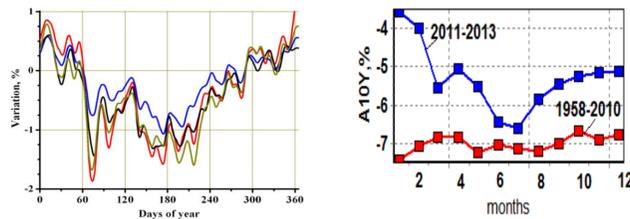


Рис.4 Средняя ГВ КЛ по группам станций: низко- (голубой), среднеширотные (черный), южно- (красный) и севернополярные (салатный).

Для сравнения годовых вариаций КЛ в различные периоды были получены годовые вариации КЛ для 5 периодов солнечной активности, в основном близких к минимумам СА (рис.6). Кроме 2011-2013 гг достаточно отчетливо проявляется годовая вариация с минимумом летом в 1972-1976 гг. но её амплитуда меньше. Годовая вариация в 1986-1987 гг. имеет летом не минимум, а максимум, она, по-видимому, связана со специфическим поведением КЛ в 1987 г., когда резко изменился знак производной плотности КЛ во времени.



Рис.5 Вариация плотности КЛ (10 ГВ) в 2011-13 гг. и в 1958-2010 без периодов высокой СА.

Солнце или гелиосфера? То, что ГВ КЛ наблюдается и имеют близкие фазы на самых разных станциях свидетельствует об её внеземном происхождении. Это и вариации плотности КЛ позволяют считать, что годовая вариация КЛ на наземных детекторах в 2011-2013 гг. имеет внеземную природу. Таким образом, исключаются возможные объяснения за счёт локальных условий. Другое традиционное объяснение, связывающее годовую волну с широтным распределением КЛ во внутренней гелиосфере также противоречит фактам. Рассмотрим гелиоширотное распределение плотности КЛ. Чтобы получить рис.7, из вариаций А10У плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ была выделена годовая гармоника и её среднемесячные значения сопоставлены с гелиоширотой Земли. Это было сделано для 2010 г. и для усреднённых вариаций в 2011-2013 гг. Видно, что в 2010 г. имеется небольшая годовая волна (~0.2%) и существует зависимость от гелиошироты, а в период 2011-2013 гг исчезает гелиоширотная зависимость, а годовая вариация (минимум - летом, максимум – зимой) существенно увеличивается. Из этого рисунка можно сделать два вывода: 1) при переходе от 2010 к 2011 г. сезонная зависимость КЛ резко изменяется и годовая вариация аномально возрастает; 2) аномально большая годовая вариация 2011-2013 гг. не связана с изменением пространственного положения Земли относительно гелиоэквиатора.

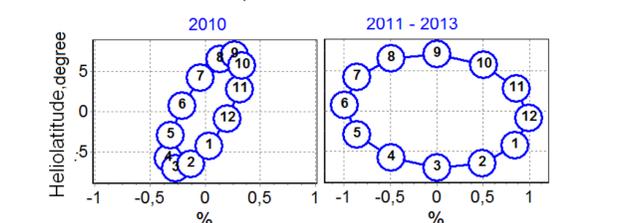


Рис.7 Гелиоширотное распределение годовой вариации плотности КЛ для 2010 и 2011-2013 гг.

Поскольку традиционные механизмы не подходят, для объяснения выделенной годовой вариации нужно искать что-то другое и можно предложить два типа гипотез – пространственные и временные. Пространственные объяснения означают квазистационарную асимметрию относительно Солнца потока КЛ. Стационарность здесь – это независимость от вращения Солнца и существование на протяжении нескольких лет. Это предполагает асимметрию области модуляции КЛ и гелиосферы. Центр области модуляции должен быть при этом не на Солнце, а ближе к Земле в летние месяцы. Азимутальная асимметрия должна присутствовать не только во внешней, но и во внутренней гелиосфере. Такое объяснение требует изменение формы и/или структуры гелиосферы и его можно называть гелиосферным. Другое (временное) объяснение требует, чтобы модуляция КЛ несколько лет похаживала бы по сезонам, создавая квазигодовую периодичность. В этом случае мы должны увидеть похожую периодичность в параметрах солнечного ветра, прежде всего, в ММП. Следовательно, вариации с периодом, близким к году, должны присутствовать и в солнечных (главным образом, магнитных) характеристиках. Поэтому временные объяснения можно называть солнечными. Солнце является источником солнечного ветра и ММП, СА определяет форму гелиосферы и ее границы, поэтому причиной всех вариаций космических лучей (и, в частности, рассматриваемой вариации) является Солнце. Но здесь, противопоставляя гелиосферу Солнцу, мы хотим выделить главное место действия процессов, определяющих создание ГВ КЛ: около Солнца или на значительном удалении от него, возможно, на окраине системы.

Возможности пространственного (гелиосферного) объяснения. Межзвездное пространство в окрестностях Солнца заполнено нейтральным газом и плазмой, межзвездным магнитным полем. Поэтому движение в межзвездной среде обособленной области (гелиосферы), заполненной плазмой и магнитным полем (ММП), в качественном плане подобно магнитосфере Земли, на которую набегают поток солнечного ветра. Со стороны набегающего потока магнитосфера поджата, возникает сверхзвуковая волна [Ness et al, 1964] и область более сильного турбулентного магнитного поля. Все это приводит к возникновению барьера на пути движения частиц внутрь магнитосферы. С противоположной стороны возникает растянутый хвост магнитосферы с пониженным барьером. Известно что протоны и электроны умеренных энергий не могут преодолеть барьер на фронтальной стороне магнитосферы, зато легко проникают внутрь ее со стороны хвоста. Аналогичный механизм присутствует и в гелиосфере. Лармеров радиус протона с энергией 20 ГэВ в магнитном поле у границы гелиосферы, равном 10^{10} Тл равен 2 а.е. Заполненная турбулентной плазмой переходная область от гелиосферы к межзвездной среде [Izmodenov, 2004] имеет поперечный размер в десятки а.е. Даже для протона 20 ГэВ это становится некоторым препятствием: толщина барьера, заполненного турбулентной плазмой, много больше лармеров радиуса. В итоге диффузия КЛ внутрь гелиосферы происходит несимметрично, проникнуть частицам со стороны хвоста гелиосферы легче, чем с ее головы. Это означает, что относительно Солнца распределение КЛ несимметрично, и более бедная область находится между Солнцем и головой гелиосферы.

Соответственно, когда Земля находится между Солнцем и хвостом гелиосферы, поток КЛ больше, чем когда между Землей и хвостом располагается Солнце. Точка направления движения солнечной системы относительно межзвездного газа близка к положению Солнца на небесной сфере в декабре (а Земля при этом находится от Солнца в сторону хвоста гелиосферы). Также это и время максимума ГВ КЛ. Соответственно, летом, в минимуме ГВ КЛ, все наоборот. Почему же тогда эту вариацию не наблюдают постоянно? Во-первых, как отмечалось выше, в максимуме СА частые СМЕ и целые серии их маскируют ГВ КЛ посредством Форбуш-эффектов, вызывающими понижение потока КЛ (иногда на 10-30% – на порядок больше, чем наша вариация). Во-вторых, напряженность ММП в максимуме СА выше, скорость и плотность солнечного ветра больше, соответственно, граница гелиосферы отодвигается от Солнца, ее влияние на внутренние области становится меньше, а распределение КЛ внутри гелиосферы становится равномернее. Кроме того, усиление среднего поля ММП затрудняет в целом проникновение КЛ внутрь гелиосферы и тонкие эффекты вроде годовой вариации в КЛ просто подавляются. Все эти факторы действуют в условиях обычного максимума СА, но максимум текущего цикла так низок, что особенности, присущие обычной фазе максимума могут не проявиться.

Возможности временного (солнечного) объяснения. Поскольку мы говорим о вариациях КЛ, из всех характеристик солнечного ветра важнее всего параметры межпланетного магнитного поля (ММП). Используются измерения модуля ММП Вt за 2007-13.



Рис.8 Годовая вариация модуля вектора ММП Вt за 2007-09 и 2011-13 гг. Около линий показаны базовые за данный период значения ММП, т.е. уровень, от которого отсчитывается годовая вариация.

В 2007-09 в модуле вектора ММП Вt наблюдается годовая вариация (рис.8) амплитудой 5-8% (т.е. 0.2-0.4 нТ в абсолютных единицах) и минимумом, приходящимся на начало июля. Это известная вариация, обусловленная эллиптичностью орбиты Земли. В 2011-13 характер вариации кардинально меняется: вместо минимума Вt в середине года появляется максимум амплитудой до 0.7 нТ. Учитывая тот факт, что Земля летом находится дальше от Солнца, как зимой, истинная амплитуда вариации в 2011-13 годах доходит до 1 нТ.

Также были исследованы данные о плотности N и скорости солнечного ветра V в 2007-13 гг. В период 2011-13 годовая вариация V хорошо заметна, а в другие годы почти отсутствует. Увеличение скорости солнечного ветра в летний период на ~60 км/с (~15%) и усиление ММП на ~1 нТ (~20%) должно приводить к уменьшению потока КЛ. Есть основания [напр. Belov et al., 2001] думать, что долговременные вариации КЛ теснее, чем с модулем ММП В и скоростью солнечного ветра V, связаны с их произведением ВV. Среднемесячные значения параметра ВV усреднённые по одинаковым месяцам 2007-2009 и 2011-2013 гг. приведены на рис. 9. Поведение параметра ВV, характеризующего состояние гелиосферы для двух периодов значительно различается (летом на ~20%) в ту же сторону, что и вышеприведенные результаты.

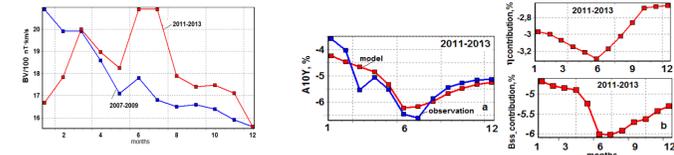


Рис.9 Годовая вариация параметра ВV для 2007-2009 и 2011-2013 гг.

Рис.10а - ГВ КЛ А10У в 2011-2013, наблюдаемая и полученная из модельных расчетов, б - вклад в модуляцию КЛ от изменения наклона ГТС и от изменений Вss-средней напряженности магнитного поля Солнца в 2011-2013.

Модельные расчёты, показали, что сильнее всего на модуляцию КЛ влияют две характеристики крупномасштабных магнитных полей на Солнце – B_{SS} – среднее магнитное поле, определенное для поверхности источника солнечного ветра) и - наклон гелиосферного токового слоя (ГТС), определяемый также на поверхности источника. На основе многопараметрического моделирования модуляции КЛ, где в качестве главных характеристик СА использованы наклон ГТС и B_{SS} , получена ожидаемая годовая вариация амплитуды А10У ≈ 1% для 2011-2013 (рис. 10а). Здесь же приведена амплитуда наблюдаемых вариаций за этот период, определенная методом глобальной съёмки (≈1.5%). Видно, что имеется согласие рассчитанных (в % относительно базы 2009г) и наблюдаемых значений амплитуды годовых вариаций для КЛ с жесткостью 10 ГВ. Наибольшее расхождение наблюдается в марте, и оно связано с ранее упомянутыми Форбуш-понижениями.

Выводы. В 2011-2013 гг. обнаружена аномально большая годовая вариация КЛ. Вариация наблюдается на большинстве станций мировой сети НМ, а также в изотропной составляющей плотности космического излучения, полученной по данным всей сети станций КЛ. Минимум этой вариации приходится на июнь-июль, максимум на декабрь-январь. Амплитуда вариации составляет около 1% на низкоширотных станциях и около 1.5% на высокоширотных. Для плотности КЛ с жесткостью 10 ГВ амплитуда годовой волны $1.0 \pm 0.1\%$. Показано, что аномалия имеет внеземное происхождение, но не связана с изменениями гелиошироты Земли. Подобная, но меньшая, вариация обнаружена в данных НМ в 1973-76, а с 1977 по 2010 отсутствует. В 2011-2013 гг. обнаружена квазигодовые вариации напряженности межпланетного магнитного поля и характеристик солнечного магнитного поля. Рассмотрены две возможные гипотезы, объясняющие появление годовой волны в КЛ: гелиосферная или пространственная, связывающая выявленную аномалию с асимметрией гелиосферы и солнечная или временная, объясняющая аномалию изменениями на Солнце во времени. Согласие поведения космических лучей с изменениями межпланетных и солнечных параметров и результаты моделирования модуляции КЛ говорят в пользу временного (солнечного) объяснения. Параметры солнечного магнитного поля так менялись во времени в 2011-2013 гг., что смогли создать значительную вариацию в КЛ с периодом близким к году. Можно принять это объяснение, но оно ставит несколько вопросов для будущих наблюдений и исследований. Что покажет 2014 г. и насколько длительной будет выявленная аномалия? Является ли такое поведение солнечных магнитных полей случайностью или мы видим проявление какой-то закономерности? Как связана данная аномалия с другими необычными особенностями последних лет: с рекордно глубоким минимумом солнечной активности, со значительным уменьшением солнечного дипольного магнитного поля и т. п.?