УДК 524.1-352

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОБЫТИЙ ВОЗРАСТАНИЯ ФОНОВОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. Ю. В. Балабин^{1,} *, А. В. Германенко¹, Е. А. Михалко¹, Е. А. Маурчев¹

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия *E-mail: balabin@pgia.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г. После доработки 05.11.2021 г. Принята к публикации 22.11.2021 г.

Проведен сравнительный анализ данных о вариациях электромагнитной компоненты за полный цикл солнечной активности (СА) для выявления особенностей возрастаний гамма-излучения при различных фазах СА. Вариации интенсивности космических лучей регистрируются в Апатитах разными детекторами, охватывающими все основные компоненты вторичных космических лучей: нуклонную, электронно-мюонную и электромагнитную (гамма-излучение).

DOI: 10.31857/S0367676522030048

ВВЕДЕНИЕ

Эффект возрастания гамма-излучения при осадках был открыт в лаборатории космических лучей Полярного геофизического института (ПГИ) в 2009 г. [1]. С тех пор продолжается его пристальное изучение [2, 3]. Насущная потребность его изучения в том, что выявлен дополнительный механизм взаимодействия вторичных космических лучей (ВКЛ) с атмосферой. Этот механизм, по всей вероятности, отражает влияние метеорологических процессов (помимо давления и температуры) на потоки ВКЛ в атмосфере.

Электромагнитная компонента (гамма-излучение) ВКЛ производится в атмосфере несколькими процессами [4]: распад мезонов, при котором образуются непосредственно гамма-кванты высокой энергии (десятки и сотни МэВ), тормозное излучения легких заряженных частиц (электронов и позитронов), также образующихся при распаде мезонов, и аннигиляция позитронов. При распространении в атмосфере гамма-кванты с высокой вероятностью рождают электрон-позитронную пару, которая затем также производит тормозное гамма-излучение. В атмосфере возникает каскад [5]: квант – легкие частицы – новые кванты – новые легкие частицы – и так далее, так что на земную поверхность из атмосферы поступает в основном гамма-излучение умеренных энергий (до 5–10 МэВ).

По мере накопления данных на ст. Апатиты возникали вопросы о природе и механизме открытого явления, которые можно было решить только созданием новых точек наблюдений в других климатических и геофизических условиях. К настояшему времени имеются шесть станций (от п. Баренцбург на Шпицбергене до п. Нейтрино на Северном Кавказе), на которых выполняется мониторинг потоков гамма-излучения в приземном слое атмосферы. Используются однотипные детекторы на основе сцинтилляционных кристаллов, разработанные в ПГИ десятки лет назад и использовавшиеся во многих экспериментах. Были проведены различные эксперименты (подробнее о них рассказано в [1-3]), и установлено, что возрастания гамма-излучения при осадках наблюдаются круглый год на всех станциях. Эти возрастания не связаны с загрязнением осадков радионуклидами и регистрируются только в электромагнитной компоненте, отсутствуют в заряженной. За прошедшее время на ст. Апатиты (как наиболее долго работающей) накоплена огромная база данных событий возрастания (более 900 событий) электромагнитного излучения различной амплитуды и длительности, позволяющая провести сравнительный анализ их параметров на протяжении цикла солнечной активности с 2010 по 2020 г.

Солнечный 11-летний цикл активности проявляется в модуляции потока космических лучей [4]. Он легко обнаруживается в данных нейтронных мониторов или мюонных телескопов как 11-летняя вариация. Выполнение мониторинга фонового гамма-излучения, приходящего из атмосферы, на протяжении десятка лет показало наличие подобной вариации. В этом нет ничего необычно-го, поскольку гамма-излучение возникает в атмо-

сфере как один из компонентов ВКЛ [4, 5]. Гамма-излучение возникает в атмосфере в результате распада различных короткоживущих частиц. Также легкие заряженные частицы производят тормозное гамма-излучение при движении в атмосфере. Особенностью фонового гамма-излучения в атмосфере является его непрерывный спектр, имеющий степенную зависимость от энергии, и отсутствие характеристических линий элементов.

Как было отмечено выше, мониторинг потоков фонового гамма-излучения выявил интересный эффект — возрастание потока излучения при осадках. Этот эффект наблюдается на всех станциях от Шпицбергена до Кавказа, проявляется круглый год. Амплитуда возрастания достигает в отдельных случаях 100% относительно уровня хорошей погоды накануне, длительность зависит от длительности осадков и порой достигает нескольких суток.

Наличие большой базы данных по событиям возрастаний на протяжении 2010—2020 г. позволяет провести исследование и ответить на вопрос: проявляется ли солнечная активность в характеристиках событий возрастаний: их амплитуды, частоты событий, выделившейся энергии.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На всех станциях измерения проводятся с помощью сцинтилляционного детектора, разработанного в ПГИ для исследований рентгеновского излучения в стратосфере. Используется кристалл NaI(Tl) размером \emptyset 62 × 20 мм. Имеются выходные каналы >20, >60, >100 и >200 кэВ, в наших исследованиях используются только два канала >20 и >100 кэВ. Для исключения влияния гаммаизлучения от земли и различных объектов детекторы помещены в стаканы, сложенные из свинцовых кирпичей размером 200 × 100 × 50 мм. Глубина стакана примерно в полтора раза больше высоты детектора, так что прием излучения производится из сектора в верхней полусфере, в который не попадают наземные объекты. Для калибровки детекторов использовались линии америция-241 и цезия-137. Детекторы гамма-излучения располагаются в строениях с легкой крышей (типа чердака) в термостабилизированных боксах, чтобы снизить температурные колебания внешней среды. Температура кристалла является одной из непрерывно контролируемых величин, и она в течение года изменяется не более, чем на 2° C, что для задач мониторинга потоков гамма-излучения является хорошим показателем.

На рис. 1 приведены вариации потоков космических лучей по данным нейтронного монитора (HM), бессвинцовой секции HM и гамма-детектора. Бессвинцовая секция HM чувствительна к нейтронам с энергиями от тепловых (0.025 эВ) до 1 МэВ. В данных бессвинцовой секции четко наблюдается годовая вариация, связанная с сезонными изменениями на поверхности земли и атмосферы [5]. У НМ, который чувствителен к нуклонам с энергией >50 МэВ [4], сезонной вариации не наблюдается, а имеющиеся на профиле вариации связаны с изменениями солнечной активности.

Сезонная вариация в потоках гамма-излучения наибольшая, достигает 25% в Апатитах. По-видимому, это обусловлено сложением нескольких эффектов от сезонных изменений в атмосфере, и в первую очередь связано с атмосферным температурных эффектом [4, 6]. "Бахрома" на профиле гамма-детектора является теми самыми событиями возрастания гамма-излучения при осадках, но сильно усредненными. Хотя сезонная зависимость числа событий и амплитуды заметна на глаз, для надежных выводов требуется в первую очередь устранить в данных гигантскую сезонную вариацию. На рис. 2. показан результат удаления из данных этой вариации. Устранение сезонной вариации осуществлено методом сглаживания и фильтрации данных. Полученная чистая сезонная вариация затем вычиталась из исходных данных. Разность является превышением потока гамма-излучения над текущим базовым уровнем. Эта разность рассматривается как дополнительный поток, обусловленный локальным состоянием атмосферы. Отметим, что базовый уровень вычислялся не как средний за несколько лет, а именно средний для данного года и текущего момента (почему и назван текущим базовым уровнем). Такой метод обеспечил выделение дополнительного потока с меньшей ошибкой, поскольку сезонная вариация каждый год имеет свои особый профиль (см. рис. 1) в соответствии с особенностями состояния атмосферы каждый год. Все дальнейшие операции проводились с этим дополнительным потоком (разностью).

Как видно из рис. 1*в*, события возрастания гамма-излучения случаются десятки раз в год ("бахрома" над красными линиями), причем, и амплитуда и частота событий увеличиваются в теплый период. Амплитуда возрастаний отсчитывается от текущего базового уровня (уровень хорошей погоды непосредственно перед событием).

Дополнительными измерениями было установлено, что во время возрастаний не наблюдается изменений спектра, а происходит только пропорциональное увеличение потока. Для этого параллельно в общую систему сбора данных был включен измеритель дифференциального спектра гамма-излучения. Он создан на кристалле NaI(Tl) размером Ø150 × 100 мм, имеет рабочий диапазон 0.1–10 МэВ. Именно на этом спектрометра было точно установлено, что какие-либо характеристические линии отсутствуют (кроме



Рис. 1. Примеры 11-летней вариации, связанной с солнечной активностью. Данные нейтронного монитора (*a*). Данные бессвинцовой секции нейтронного монитора (*б*). Данные гамма-детектора на ст. Апатиты, где верхний график (черным цветом) соответствует потоку квантов E > 20 кэВ, а нижний (синий) – E > 100 кэВ, красной линией на обоих графиках показан текущий базовый уровень (*в*).

неустранимой линии калий-40) в спектре гаммаизлучения как в ясную погоду, так и при возрастании [7, 8]. Зная форму спектра, можно вычислить среднюю энергию, приносимую одним гаммаквантом и вызывающего один импульс в детекторе. Таким образом, счет детектора пересчитывается в энергию, выделившуюся в детекторе от дополнительного потока гамма-излучением за установленное время. Такая замена дает возможность пользоваться интегральной величиной, а не средней, хотя в ряде случаев они могут совпадать. На рис. 3. приведен результат: суммарная выделившаяся за месяц энергия, принесенная дополнительными гамма-квантами. В отличие от рис. 2, явно выражена зависимость выделившейся энергии от фазы солнечной активности. События возрастания амплитудой более 50-60% отмечались почти каждый год, в амплитудном распределении зависимости от фазы цикла не заметно (см. рис. 2).

Однако, при переходе к величине выделившейся энергии (рис. 3*a*) такая зависимость становится явной.

В среднем годовом профиле выделенной энергии (рис. 3*б*) также заметны различия для периода высокой активности Солнца (2013–2016 годы) и слабой активности (2010–2012 и 2017–2020). С мая по январь наблюдается явное превышение среднего выделения энергии в период слабой активности Солнца. А в период февраль-апрель количество выделившейся энергии не зависит от фазы цикла и находится на минимуме.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Отдельные события возрастания в летний период каждый год случаются амплитудой от 50 до 100%, однако, уже по рис. 2 можно заметить, что "бахрома" в периоды малоактивного Солнца "гу-



Рис. 2. Вариации потока гамма-излучения после удаления сезонной вариации. Этот поток назван дополнительным к базовому. Канал >100 кэВ.



Рис. 3. Выделившаяся дополнительная энергия, связанная с событиями возрастания, за период 2010–2020 гг. Использовано месячное накопление. Период 2013–2016 гг. соответствует максимуму солнечной активности (*a*). Средние годовые профили выделившейся энергии для периода высокой солнечной активности (2013–2016, линия *I*) и для периода низкой солнечной активности (2010–2012 и 2017–2020, линия *2*). Получены методом наложения эпох для соответствующих периодов (*б*). Стандартное отклонение составляет ~1.5 единиц шкалы для обоих графиков. Оно не показано, чтобы не загромождать рисунок.

ще и выше", чем в период высокой активности. При этом сам базовый уровень испытывает годовые колебания около 30%, что маскирует возможные небольшие вариации другой природы. Разработанная методика позволяет выделить дополнительный поток, создаваемый событиями возрастаний, и обнаруживает, что действительно интенсивность событий возрастания зависит от 11-летнего солнечного цикла, снижаясь в период максимума солнечной активности (20132016) и возрастая в периоды малой активности Солнца. Это касается как пиковых выделений энергии, так и среднего годового профиля за несколько лет. Причем, наибольшие различия приходятся на вторую половину года (лето и осень).

В целом такая зависимость не вызывает удивления. Поток космических лучей, приходящий на Землю, имеет 11-летнюю вариацию, причем, максимум активности Солнца приходится на минимальный поток космических лучей. Поскольку гамма-излучение, возникающее в атмосфере, производится ВКЛ, вероятно, оно будет иметь те же вариации, что и ВКЛ. Однако, более сильные годовые вариации, связанные с сезонными изменениями атмосферы, маскируют более слабые, связанные с 11-летним циклом. Примененная метолика позволила вылелить отлельно варианию. связанную с 11-летней солнечной активностью. Пока такие длинные ряды данных имеются для одной станции. Было бы полезно установить, как зависят вариации от геофизических условий, и проанализировать данные других станций. В настояшее время измерения фонового гамма-излучения выполняются на архипелаге Шпицберген (морской арктический регион), в Ростове-на-Дону (степная равнинная область), в Восточных Саянах и на Кавказе (высокогорная область), но пока ряды данных на этих станциях короткие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие в Апатитах данных о потоках гаммаизлучения на протяжении всего 24-го цикла солнечной активности (2010–2020) позволило провести поиск вариаций, не связанных с сезонными изменениями атмосферы. Обнаружено, что дополнительный поток гамма-квантов, создаваемых событиями возрастания при осадках, уменьшается в период максимума солнечной активности в 2013— 2016 гг. Вероятнее всего, это изменение связано с общим уменьшением потока ВКЛ при максимуме солнечной активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V. et al. // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7. No. 4. P. 471.
- Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 5. С. 639; Balabin Y.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B., Vashenyuk E.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. No. 5. P. 572.
- Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В. // Геомагн. и аэроном. 2014. Т. 54. № 3. С. 376.
- Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 402 с.
- 5. *Мурзин В.С.* Введение в физику космических лучей. М.: Изд-во МГУ, 1988. 320 с.
- 6. Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 210 с.
- Balabin Yu.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B., Vashenyuk E.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. Art. No. 012243.
- Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Vashenyuk E.V. // J. Phys. Conf. Ser. 2013. V. 409. Art. No. 012241.

Influence of solar activity on the characteristics of background gamma radiation increasing events

Yu. V. Balabin^{a, *}, A. V. Germanenko^a, E. A. Mikhalko^a, E. A. Maurchev^a

^a Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia *e-mail: balabin@pgia.ru

A comparative analysis of variations in the intensity of cosmic rays during the he solar cycle (SC) is carried out to reveal the features of increases at different phases of solar activity. Variations in the intensity of cosmic rays are recorded in Apatity by various detectors that cover all the main components of secondary cosmic rays: nucleon, electron-muon and electromagnetic (gamma radiation).