

Сезонные изменения спектра фонового гамма-излучения в приземном слое воздуха

БАЛАБИН Ю. В., GERMANENKO A. V.
Полярный геофизический институт КНЦ РАН,
email: balabin@pgi.ru germanenko@pgia.ru

1. Введение

В Полярной геофизическом институте в течение нескольких лет ведется непрерывный мониторинг различных компонентов вторичных космических лучей. Для этого была создана комплексная система мониторинга радиационного фона в различных видах излучений: нейтронной компоненты, низкоэнергичной заряженной и низкоэнергичной электромагнитной компонент [1-3]. На атмосферу земли из космического пространства падает поток первичных космических лучей. Попадая в атмосферу Земли и сталкиваясь с ядрами атомов, частицы первичного потока вызывают каскад ядерных реакций и ливни вторичных частиц. Именно эти вторичные частицы и достигают нижних слоев атмосферы и поверхности земли. Среди них имеются электроны, мюоны, гамма-кванты и нейтроны.

2. Комплексная установка мониторинга вторичных космических лучей

К настоящему времени комплекс в законченном виде работает на ст. Апатиты (Мурманская обл.) и в усеченном виде на ст. Баренцбург (арх. Шпицберген). В него помимо стандартного нейтронного монитора (НМ) входят детекторы гамма-квантов на сцинтилляционных кристаллах (СД), бессвинцовая секция нейтронного монитора (БСНМ), детектор заряженной компоненты (ДЗК) и детектор тепловых нейтронов (ДТН). Сцинтилляционные детекторы регистрируют гамма-излучение в общем диапазоне энергий от 20 кэВ до 5 МэВ (два поддиапазона: 20-400 кэВ и 0.2-5 МэВ), НМ чувствителен к нейтронам с энергиями более 50 МэВ [4], БСНМ – к нейтронам с энергиями в сотни кэВ, ДТН – тепловые нейтроны, ДЗК регистрирует все заряженные частицы (мюоны, электроны, позитроны) с энергиями более ~ 5 МэВ. С помощью сцинтилляционного детектора и многоканального амплитудного анализатора непрерывно ведутся измерения дифференциального спектра гамма излучения с временем накопления одного спектра в 30 минут. Данные со всех приборов поступают в общую систему регистрации [1]. Также подобная система, пока в усеченном виде, создана в Баренцбурге. На данный момент она состоит из трёх секций стандартного нейтронного монитора и сцинтилляционного гамма-детектора. Анализ данных за последние несколько лет, получаемых с этих установок, выявил наличие сезонных вариаций в некоторых компонентах космических лучей.

3. Сезонные вариации излучения

Рентгеновский фон в приземном слое атмосферы имеет сезонные колебания, что приводит к годовой вариации в этой компоненте излучений. Она наблюдается как в Апатитах, так и на станции в Баренцбурге. Для примера приведен профиль интенсивности гамма-излучения на ст. Баренцбург за 2010-15 г.г. (рис.1). Как видно из графика поток гамма-излучения испытывает вариации, увеличиваясь весной-летом, достигая максимума в июле-августе, и уменьшаясь зимой с минимумом в конце марта (Апатиты) и в апреле-мае (Баренцбург). В Апатитах амплитуда годовой вариации составляет $\sim 25\%$, в то время как в Баренцбурге она доходит до 50%. При этом “бахрома”, присутствующая на графике, соответствует другому явлению – возрастанию гамма-фона при осадках [1, 3]. На рисунке 2 показана среднегодовая вариация гамма-излучения, вычисленная методом наложения эпох. Вариация имеет выраженный несимметричный характер: достаточно широкий плоский максимум на протяжении теплого сезона и спад в период осени-зимы с резким ростом в весенний период. При этом в Баренцбурге спад начинается раньше, а рост позже.

Отметим, что обе станции располагаются далеко от зон тектонических разломов, а Баренцбург находится в зоне вечной мерзлоты. Эти факторы означают, что выделение радона из почвы минимально или вообще отсутствует и, соответственно, не может служить причиной вариации. Против радоновой гипотезы также говорит факт отсутствия подобной вариации в заряженной компоненте. В работе [5] приводится подробное описание дополнительно выполненных экспериментов, подтверждающих отсутствие вклада в эти вариации каких-либо радионуклидов-загрязнителей природного или антропогенного характера.

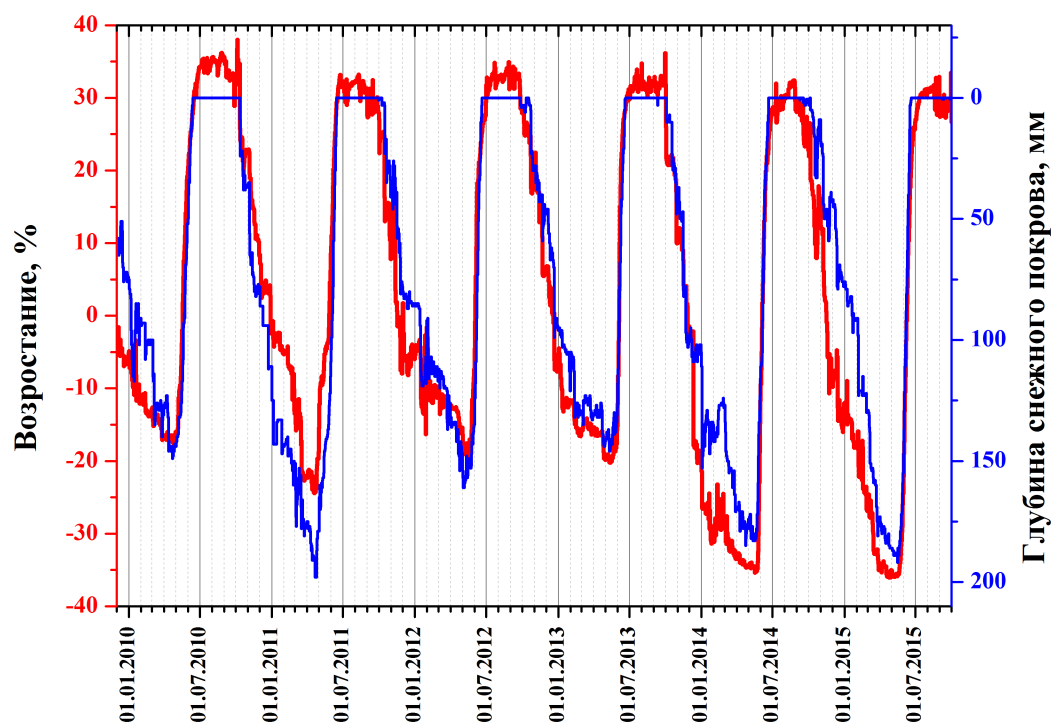


Рис. 1. Вариации счета СД в Баренцбурге за период 2010-15 гг. (красная линия) и толщины снежного слоя (синяя). Ось ОУ справа, показывающая толщину снежного покрова, направлена вниз для удобства восприятия синхронности изменений этих двух величин. Данные о снежном покрове взяты из <http://gr5.ru>.

Наличие корреляции между толщиной снежного покрова и потоком гамма-излучения не вызывает сомнения, что, в свою очередь, дает основания полагать, что именно экранирование излучения от почвы, которое создает снежный покров, и является причиной годовых вариаций гамма-излучения. Эффект не вызывает сомнений, однако, полной ясности не удастся достичь. Во-первых, напомним, что СД размещены в глубоких свинцовых стаканах со стенками толщиной 50 мм, открытых сверху. Чтобы попасть в СД, квантам необходимо испытать рассеяние на большие углы (около 180 градусов), что для квантов с энергиями в десятки и сотни кэВ маловероятно. Такие большие годовые вариации трудно объяснить и вариациями температуры атмосферы.

В Апатитах развернута полная версия комплекса для мониторинга, и для этой станции имеются данные о годовых вариациях в мягкой нейтронной компоненте (бессвинцовая секция). Эти данные показывают, что годовая вариация нейтронного потока с энергиями до сотен кэВ подобна показанной на рис.2: она очень хорошо коррелирует с толщиной снежного покрова и совпадает по фазе с вариацией в гамма-излучении. Амплитуда вариации на БСНМ не превышает 5 %. Объяснение годовых вариаций на БСНМ достаточно простое и известное [4, 6]. Нейтронный фон у земли складывается из потока, приходящего сверху из

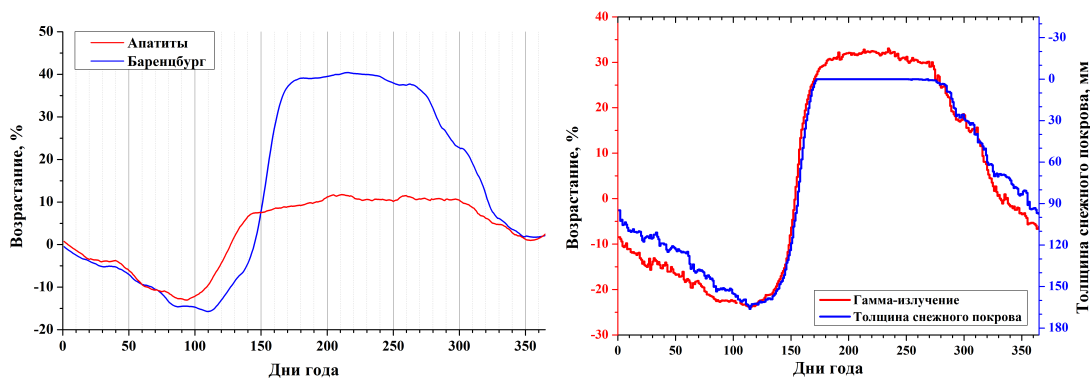


Рис. 2. Профили среднегодовой вариации гамма-излучения в приземном слое атмосферы на станциях Апатиты и Баренцбург (слева). Профили среднегодовой толщины снежного покрова и потока гамма-излучения в приземном слое атмосферы на станции Баренцбург (справа). Профили вычислены методом наложения эпох за период 2010-15 гг.

атмосферы, и потока альбедных нейтронов. Свободный нейтрон достаточно эффективно тормозится в процессе упругих столкновений с ядрами водорода, поскольку массы протона и нейтрона близки [7]. Снежный покров уменьшает поток альбедных нейтронов из почвы (снег – вещество с высоким содержанием протонов, что обеспечивает эффективное замедление нейтронов и меньший их выход в атмосферу), что ведет к уменьшению потока, регистрируемого БСНМ. Отсутствие влияния снега на НМ объясняется как раз наличием внешнего полиэтиленового слоя, обеспечивающим защиту НМ от альбедных нейтронов и других локальных причин.

4. Годовые вариации спектра гамма-излучения

Помимо измерений интегрального потока гамма-излучения ведется непрерывная регистрация дифференциального спектра в диапазоне 0.2-5 МэВ. Созданный в лаборатории измеритель дифференциального спектра собран на основе сцинтилляционного кристалла $\emptyset 150 \times 100$ мм NaI(Tl) и цифрового анализатора импульсов. Кристалла БСД имеет размер $\emptyset 150 \times 100$ мм. Время накопления одного спектра составляет 30 минут. Дифференциальный спектр гамма-излучения (спектр гамма-фона) в ясную погоду в холодный сезон имеет степенную форму с показателем $\gamma \approx -1.8$, что близко к значению для тормозного излучения [8]. В максимуме вариации (летом) в спектре гамма-излучения появляется дополнительная составляющая: спектр становится круче. Однако, распространяется такая добавка только до 600-800 кэВ. В больших энергиях спектр не меняется. В то же время при другом явлении – возрастании потока гамма-излучения при осадках – изменения спектра простираются до 2-2.5 МэВ. Факт, что сезонная вариация гамма-фона совпадает по фазе и положениям максимума и минимума с сезонной вариацией в мягкой нейтронной компоненте позволяет с достаточной долей уверенности считать эти два явления связанными. Известно, что тепловые нейтроны у поверхности земли практически не распадаются [7, 9], а вступают в ядерные реакции. Это вполне понятно, поскольку ядерные реакции с нейтронами являются беспороговыми, а собственное время жизни свободного нейтрона (~ 1000 сек) много больше, чем время его свободного существования в веществе. Поглощение нейтрона сопровождается выделением энергии, одним из основных каналов которой – испускание возбужденным ядром гамма-кванта. Остается пока не ясным пороговое значение вариации – 800 кэВ.

5. Заключение

В ходе мониторинга различных компонент вторичных космических лучей у поверхности земли обнаружена годовая вариация потока гамма-фона. Амплитуда ее составляет $\sim 25\%$ в Апатитах и 50% в Баренцбурге. Дополнительное излучение, обусловленное этой

вариацией, накладывается на степенной спектр фонового излучения. При этом верхняя граница этого излучения составляет 600-800 кэВ. Вероятной причиной генерации этого дополнительного излучения являются нейтроны умеренных энергий (до сотен кэВ), вариация потока которых точно повторяет годовую вариацию гамма-излучения. Это предположение хорошо согласуется со свойствами указанных нейтронов: они легко вступают в ядерные реакции с ядрами окружающего вещества с последующим выделением энергии возбужденным ядром.

Мониторинг дифференциального спектра фонового гамма-излучения позволил также разделить два наблюдающихся явления: годовую вариацию и возрастание при осадках, ранее хорошо изученную нами. Хотя амплитуды этих явлений примерно равны (десятки процентов), однако, энергетический спектр у них разный. Возрастание при осадках простирается по энергии до 2.5 МэВ, при этом дополнительное излучение имеет экспоненциальную форму спектра. Изменения спектра при годовой вариации происходит только до 800 кэВ и простой функцией не описываются.

Список литературы

1. Ю. В. Балабин, А. В. Германенко, Б. Б. Гвоздевский, Э. В. Вашенюк. Вариации естественного рентгеновского фона в полярной атмосфере // Геомagnetизм и аэрономия, Т.54, № 3, 2014, с. 376–386.
2. A.V. Germanenko, Yu.V. Balabin, B.B. Gvozdevsky, E.V. Vashenyuk. Features of the flux of gamma-radiation in the lower atmosphere during precipitation. // J. of Phys. Conf. Ser., V.409, 2013, 012241.
3. Yu.V. Balabin, A.V. Germanenko, B.B. Gvozdevsky, E.V. Vashenyuk. Variations of gamma radiation spectra during precipitations // J. of Phys. Conf. Ser., V.409, 2013, 012243.
4. Дорман Л.И. “Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей”, М.: Наука, 1975, 402С.
5. Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B., Schur L.I., Vashenyuk E.V. High-energy photons connected to atmospheric precipitations. Astrophys. Space Sci. Trans., V.7, 2011, p.471-475.
6. Казарновский М.В.: Замедление и диффузия нейтронов. Цепная ядерная реакция. Физика элементарных частиц атомного ядра. Т.26 №6, 1475-1502, 1995.
7. Hendrick L.D. and Edge R.D.: Cosmic-ray neutrons near the Earth, Phys. Rev. Ser. II, 145, 1023–1025, 1966.
8. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. М.: ИЛ, 492 с. 1956.
9. Pioch C., Mares V., Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Ruehm W. Measurement of cosmic ray neutrons with Bonner sphere spectrometer and neutron monitor at 79° N // Nucl. Instr. and Meth. A (2010), doi:10.1016/j.nima.2010.10.030.