

УДК 551.521.64

## СУТОЧНАЯ И СЕЗОННАЯ ВАРИАЦИИ МЯГКОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ

© 2019 г. Ю. В. Балабин<sup>1, \*</sup>, Б. Б. Гвоздевский<sup>1</sup>, А. В. Германенко<sup>1</sup>,  
А. А. Луковникова<sup>2</sup>, А. А. Торопов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
“Полярный геофизический институт”, Мурманск, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера  
Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра  
“Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, Якутск, Россия

\*E-mail: balabin@pgia.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Мягкое гамма-излучение, возникающее в атмосфере как часть вторичных космических лучей, до сих пор изучено очень слабо. В Полярном геофизическом институте был создан детектор гамма-излучения, и с 2010 г. начаты наблюдения на станциях космических лучей в Апатитах и Баренцбурге (арх. Шпицберген). В настоящее время наблюдения ведутся на шести станциях. В данных детекторов уверенно наблюдается две вариации: годовая и суточная. Годовая вариация связана с образованием устойчивого снежного покрова в холодный сезон. Суточная имеет особенность: положение максимума и минимума вариации расходится с аналогичными величинами на нейтронных мониторах и мюонных детекторах.

DOI: 10.1134/S0367676519050089

### ВВЕДЕНИЕ

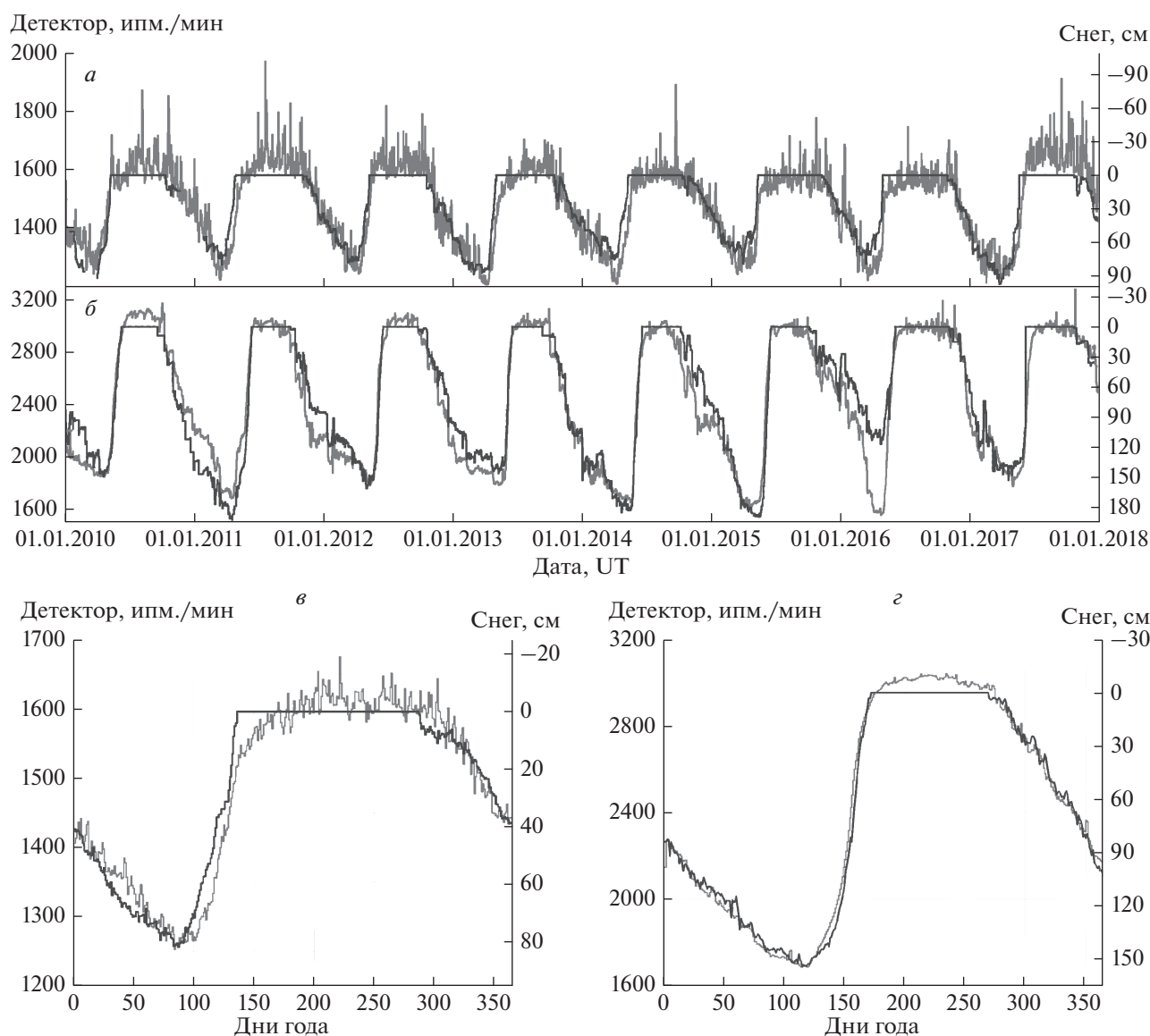
С 2010 года на станциях космических лучей в Апатитах и Баренцбурге (арх. Шпицберген) выполняется непрерывный мониторинг фонового гамма-излучения, приходящего из атмосферы. Фоновое гамма-излучение возникает в атмосфере как вторичное при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой. Основной вклад вносят следующие процессы: распад короткоживущих частиц (различных мезонов), аннигиляция позитронов, тормозные процессы и комптон-эффект [1]. Измерения выполняются однотипными детекторами на основе кристалла NaI(Tl), калиброванными по известным линиям. Диапазон эффективной регистрации детекторов 20–400 кэВ. Детекторы защищены свинцовым экраном (толщина стенок 5 см) от излучений, идущих от земли и предметов, прием ведется из верхней полусферы с углом конуса при вершине около 160°. К настоящему времени такие детекторы установлены еще в четырех пунктах в разных климатических зонах (Тикси, Якутск, Монды (Зап. Саяны), Ростов-на-Дону). Помимо отмечаемого на всех станциях такого явления как возрастание гамма-

излучения при осадках (амплитуда возрастания в отдельных событиях достигает 90%) [2–4], имеются и другие регулярные вариации гамма-фона. Это суточная и годовая вариации гамма-излучения. Характеристики обеих вариаций отличаются от наблюдаемых на других детекторах космических лучей (нейтронный монитор и мюонный детектор). Наличие большого массива данных и новая методика сравнения данных от разных станций позволяет с хорошей точностью определить средние характеристики этих вариаций и сделать несколько важных заключений.

### 1. СЕЗОННАЯ ВАРИАЦИЯ ГАММА-ФОНА

Длинные ряды наблюдений (8 полных лет) имеются на двух станциях: Апатиты и Баренцбург. Поэтому эти станции являются основными для анализа. Наблюдения на остальных станциях ведутся около двух лет при одном целом годе, их данные качественно подтверждают результат.

На рис. 1 показаны профили счета детекторов гамма-излучения на трех станциях: Апатиты, Баренцбург и Тикси. Использован абсолютный счет детектора (имп/мин, суточное усреднение), а не

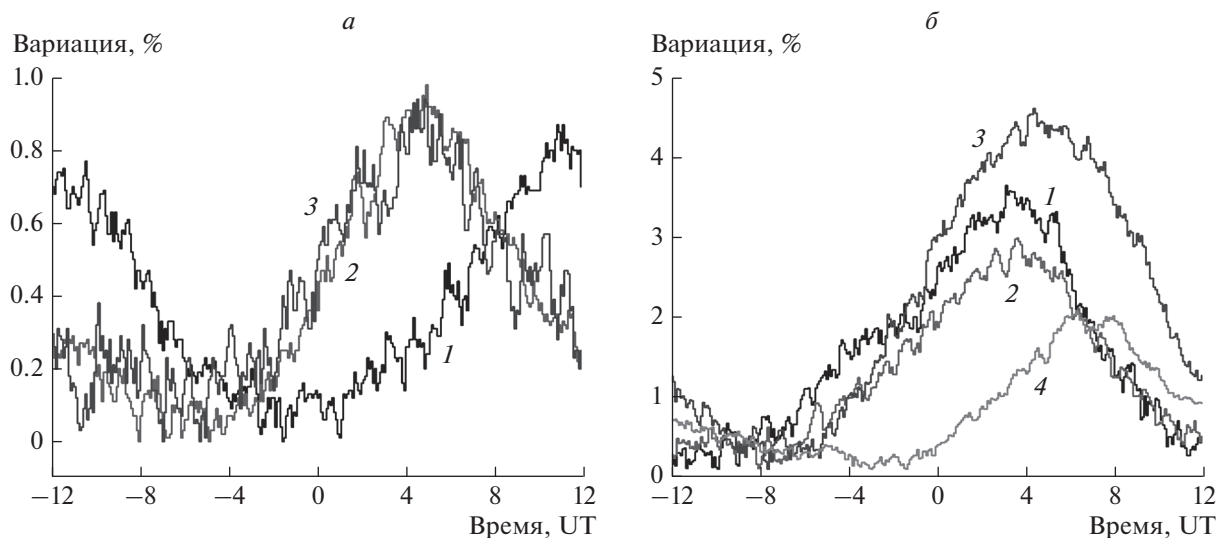


**Рис. 1.** Вариации счета гамма-детекторов (канал  $>20$  кэВ) и глубина снежного покрова на протяжении ряда лет. Шкала глубины снега инвертирована для удобства восприятия связи вариаций с толщиной снежного покрова. Панель *a* – Апатиты, панель *б* – Баренцбург. Внизу показана годовая вариация на этих станциях, полученная методом наложения эпох для Апатитов (*в*) и Баренцбурга (*г*) соответственно.

относительные вариации к некоторому среднему за много лет уровню. Представление профилей в абсолютных единицах показало, что поток гамма-излучения в теплый бесснежный период из года в год меняется мало, а годовая вариация обусловлена снижением интенсивности потока при образовании снежного покрова. “Бахрома” на профилях – усредненные за сутки возрастания во время осадков. Небольшое снижение летнего уровня от 2010 к 2015 и увеличение в 2017 – отражение модуляции космических лучей 11-летним циклом солнечной активности, максимум которой был пройден в 2015–2016 г. Минимум потока наступает, когда толщина снежного покрова максималь-

на. При таянии поток гамма-излучения восстанавливается до прежнего уровня.

Годовая вариация напрямую зависит от толщины постоянного снежного покрова [5]. На профиле средней годовой вариации четко видно, что минимум потока достигается при максимальной толщине снежного покрова; вместе с быстрым таянием происходит такое же быстрое восстановление уровня фона, тогда как снижение потока гамма-излучения на интервале осень–зима происходит постепенно, согласно увеличивающейся толщине снега. Сезонные изменения температуры атмосферы на годовую вариацию заметного влияния не оказывают. Такой вывод сле-



**Рис. 2.** *а* – Суточная вариация космических лучей по данным нейтронных мониторов в Апатитах (1), Якутске (2) и Тикси (3). Используются 80–100 дней за 2015–17 г. с хорошей вариацией для каждой станции. *б* – Суточная вариация потоков мягкого гамма-излучения (>20 кэВ) на станциях Апатиты (1), Ростов (2), Тикси (3), пик Хулугай (4). Используются данные за 50–80 дней для каждой станции с явной суточной вариацией. Отрицательные значения по шкале времени означают часть предыдущих суток.

дует из того, что в Ростове-на-Дону годовая вариация отсутствует (устойчивый снежный покров не возникает), хотя сезонные изменения температуры значительные. Также хорошо видно, что глубина “провала” зимой соответствует толщине накопившегося снега.

Наиболее подходящей гипотезой, объясняющей строгую зависимость вариаций гамма-излучения от толщины снежного покрова на всех шести станциях (в том числе и той, где нет вариаций), представляется альбедная. Нейтроны вторичных космических лучей в результате упругого взаимодействия с ядрами атомов грунта отражаются обратно в атмосферу, где теряют энергию и либо поглощаются, либо распадаются. При захвате нейтрона происходят ядерные реакции, сопровождающиеся излучением гамма-квантов. Снег – это вода, состоящая на 2/3 (по количеству) из ядер водорода, т.е. протонов. В таком веществе происходит эффективное рассеяние энергии нейтронов (точно, как внешняя защита из полиэтилена на нейтронном мониторе) [6] в процессе упругих столкновений, так что в атмосферу при наличии снежного покрова выходит меньше нейтронов.

Следует отметить лучшую корреляцию потока гамма-излучения с толщиной снежного покрова в Апатитах, чем на других станциях. Метеостанция в Апатитах располагается на низменном берегу озера, в пределах 100 м со всех сторон к ней подступает лес. В таких условиях интенсивного выдувания снега или значительного уплотнения не происходит, и метеоданные о толщине снежного покрова получаются надежными. Метеоплощад-

ка в Баренцбурге располагается на пологой прибрежной полосе залива между морем и крутым склоном. При сильных северо-западных ветрах снег частично сдувается с площадки. С декабря в Баренцбурге наблюдаются значительные отрицательные температуры, следовательно, выпавший снег не тает, он только переносится и скапливается на подветренных склонах холмов и в оврагах. Интегрально количество снега на поверхности земли не меняется при этом, просто перераспределяется. Измерения фонового излучения, падающего из атмосферы, позволяет оценить средние запасы воды в снежном покрове данной местности.

## 2. СУТОЧНАЯ ВАРИАЦИЯ ГАММА-ФОНА

Известно, что поток космических лучей имеет небольшую суточную вариацию (по данным нейтронных мониторов (НМ) ~1%), максимум вариации привязан к локальному времени на станции. Суточная вариация в космических лучах [7] вызывается небольшой анизотропией космических лучей в Солнечной системе, связана с положением Солнца и, соответственно, с локальным временем: вариации происходят на разных НМ в одно и то же местное время в 14–15 ч. Некоторые индивидуальные особенности суточной вариации на НМ обусловлены расположением асимптотического конуса приема станции. Суточная вариация на НМ наблюдается в периоды спокойной геомагнитной обстановки. На рис. 2*а* шкала времени дана единая – UT. Станции Тикси и Якутск располагаются в одном часовом поясе, и вариации у них совпадают по времени. Предпола-

галось, что суточная вариация в гамма-излучении будет достаточно близка к таковой в космических лучах, ведь гамма-излучение, возникающее в атмосфере, создается вторичными космическими лучами. Однако, как видим на рис. 2б, поведение суточных вариаций фонового гамма-излучения совсем иное.

Во-первых, амплитуда суточной вариации в гамма-излучении в несколько раз больше, чем в космических лучах. Во-вторых, несмотря на разные часовые пояса в Апатитах и Тикси (разность составляет 6 ч), вариации у них синхронные. Станция Хулугай находится на один часовой пояс ближе к Апатитам, чем Тикси, а максимум вариации сдвинут на 2 ч дальше. На приведенном графике отсутствует вариация Баренцбурга. Дело в том, что при визуальном отборе дней с вариацией было обращено внимание, что на полярных станциях (Апатиты, Тикси и Баренцбург) суточная вариация отсутствует в периоды полярной ночи, полярного дня и белых ночей. В Баренцбурге полярный день вместе с периодом белых ночей длится с начала апреля по начало сентября, а с середины октября и до конца февраля длится полярная ночь. Таким образом, в Баренцбурге очень мал промежуток, когда имеет место обычная ситуация с чередованием дня и ночи. Как сказано выше, на двух других полярных станциях этот эффект также проявляется, но эти периоды занимают малую часть года, возможность выбрать дни с суточной вариацией сохраняется. Этот факт указывает на террогенное происхождение суточной вариации в гамма-излучении. В этом случае близость фаз суточной вариации для разных часовых поясов может найти объяснение.

Достаточно близкое по времени наступление максимума суточной вариации на станциях с разницей местного времени в 6 ч означает, что эта вариация не связана напрямую с вариацией космических лучей. Также не имеет связи вариация и с другими локальными условиями (прогрев земной поверхности, атмосферы и др.). Близость времени максимума на всех трех станциях означает, что в атмосфере действует некий глобальный фактор, не связанный с местными условиями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована сезонная и суточная вариации мягкого гамма-излучения в атмосфере. Сезонная вариация на всех станциях, где возникает в зимний сезон снежный покров, точно коррелирует с толщиной снежного покрова. При этом поток гамма-излучения с наступлением теплого сезона восстанавливается до прежнего уровня. Суточная вариация гамма-излучения отличается от аналогичной суточной вариации в космических лучах по данным нейтронных мониторов. Отличия состоят в том, что вариация гамма-излучения не привязана к локальному времени в точке наблюдения. На станциях с разницей поясного времени в 6 часов максимум вариации наступает в одно и то же время 4–5 UT. Амплитуда вариации мягком гамма-излучении в несколько раз больше, чем в космических лучах. Для надежных выводов необходимо продолжить изучения суточной вариации, расширив географию наблюдений. Нужны станции с еще большим различием поясного времени, а также данные из мест, где толщина снежного (ледяного) покрова не изменяется существенно в течение года, например, на леднике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хаякава С.* Физика космических лучей Ч. 2: Астрофизический аспект. М.: Мир, 1974. 343 с.
2. *Balabin Yu.V., Germanenko A.V.* // Proc. of 33rd ICRC. Rio de Janeiro: Springer, 2013.
3. *Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Vashenyuk E.V. et al.* // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7. P. 471.
4. *Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б. и др.* // Геомагн. и аэрон. 2014. Т. 54. С. 376; *Balabin Y.V., Germanenko A.V., Gvozdevsky B.B. et al.* // Geomagn. Aeron. 2014. V. 54. P. 347.
5. *Germanenko A.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B.* // Proc. of V Int. Conf. Atmosphere, Ionosphere, Safety. (Kaliningrad. IKBFU. 2016).
6. *Дорман Л.И.* Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 161 с.
7. *Дорман Л.И.* Метеорологические эффекты космических лучей. М. Наука, 1972. 211 с.