

Научная статья
УДК 551.521.64
doi:10.37614/2949-1185.2023.2.2.001

МЮОННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ ПОЛЯРНЫХ СТАНЦИЙ АПАТИТЫ И БАРЕНЦБУРГ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ МАЛЫХ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Ю. В. Балабин¹, А. В. Германенко¹, Е. А. Маурчев², Е. А. Михалко¹, Б. Б. Гвоздевский¹

¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Юрий Васильевич Балабин, balabin@pgia.ru

Аннотация

Представлены первые результаты работы пары мюонных телескопов, установленных на станциях Апатиты и Баренцбург (арх. Шпицберген) в дополнение к имеющимся нейтронным мониторам. Предложена методика выделения малых вариаций на фоне более сильных вариаций, вызванных солнечной активностью. С ее помощью выявлена небольшая анизотропия космических лучей между направлениями приема мюонных телескопов. О причинах такой анизотропии пока трудно судить, поскольку период солнечной активности составляет 11 лет, а наблюдения велись чуть более года.

Ключевые слова:

нейтронный монитор, мюонный телескоп, космические лучи, вариация, электрическое поле в атмосфере

Благодарности:

исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 18-77-10018.

Original article

MUON TELESCOPES OF THE POLAR STATIONS APATITY AND BARENTSBURG FOR OBSERVATIONS OF SMALL VARIATIONS OF COSMIC RAYS

Yu. V. Balabin¹, A. V. Germanenko¹, E. A. Mauricev², E. A. Mikhalko¹, B. B. Gvozdevsky¹

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

²IZMIRAN, Moscow, Russia

Corresponding author: Yury V. Balabin, balabin@pgia.ru

Abstract

The first results of the operation of a pair of muon telescopes installed at the Apatity and Barentsburg stations (Svalbard) in addition to the existing neutron monitors are presented. A technique for separating small variations against the background of stronger variations caused by solar activity is proposed. With its help, a small anisotropy of cosmic rays between the directions of reception of muon telescopes was revealed. It is still difficult to judge the reasons for such anisotropy, since the period of solar activity is 11 years, and observations were made for just over a year.

Keywords:

neutron monitor, muon telescope, cosmic rays, variation, electric field in the atmosphere

Acknowledgments:

this study was supported by the Russian Science Foundation Grant No. 18-77-10018.

Введение

Две высокоширотные станции космических лучей Апатиты и Баренцбург (арх. Шпицберген) располагаются за полярным кругом и ведут непрерывную регистрацию космических лучей (КЛ). Основным регистрирующим прибором на станциях является нейтронный монитор (НМ), в Апатитах он установлен в 1969 г., в Баренцбурге — в 2003 г. Полярный геофизический институт (ПГИ) развивает систему мониторинга КЛ. К настоящему времени обе станции имеют комплексную регистрирующую систему, обеспечивающую измерение различных компонент вторичных космических лучей: нуклонную, мюонную и электромагнитную (гамма-излучение) (Мурзин, 1988).

Стандартные нейтронные мониторы наиболее эффективны к космическим лучам с энергиями 1–10 ГэВ, а верхний предел составляет ~ 20 ГэВ (Дорман, 1975). У мюонных телескопов (МТ) минимальная энергия для первичной частицы космических лучей составляет ~ 5 ГэВ, средняя эффективная энергия регистрируемых частиц — ~ 50 ГэВ, а верхний предел — сотни ГэВ (Хаякава, 1974). С ростом энергии влияние активности Солнца и гелиосферы на КЛ убывает, поэтому данные НМ и МТ о вариациях КЛ дополняют друг друга. В силу этого идея проводить мониторинг КЛ парами идентичных приборов на двух станциях представляется весьма плодотворной и полезной.

Инструменты и методика проведения наблюдений

Установленные на обеих станциях нейтронные мониторы имеют стандартную конфигурацию 18-НМ-64. Нейтронный монитор является одним из самых надежных и долговечных детекторов КЛ (Дорман, 1975). Работают десятки лет. Мюонные телескопы установлены всего пару лет назад, собраны по обычной схеме: пара сцинтилляционных пластин, расположенные одна над другой, разделены слоем свинца. Используется органический сцинтиллятор, площадь каждой пластины — $0,25 \text{ м}^2$, поле зрения составляет ~ 1 ср. Толщина свинцового — слоя 100 мм, размеры свинцового слоя в несколько раз больше размеров пластин и экранирует прием частиц со всей полусферы: для верхней пластины экранируется нижняя полусфера, для нижней пластины — верхняя полусфера. Таким образом, каждая из пластин МТ также является детектором мягких частиц (которые не способны пройти слой свинца) из соответствующей полусферы. МТ имеет три выходных канала: импульсы от верхней пластины, от нижней и от схемы совпадений. Схема совпадений выделяет из общего потока мюоны, попадающие в МТ из зенитной области неба и имеющие достаточно энергии, чтобы преодолеть слой свинца и обе сцинтилляционные пластины, вызвав импульсы в обеих пластинах. Минимальная энергия для таких мюонов составляет $\sim 300 \text{ МэВ}$ на уровне земли или $\sim 2,5 \text{ ГэВ}$ в момент рождения в верхней атмосфере. Наличие отдельных выходов от пластин позволяет использовать МТ как детектор мягких частиц: мюонов, электронов и позитронов с энергиями $> 10 \text{ МэВ}$. Верхняя пластина регистрирует заряженные частицы, приходящие из верхней полусферы, рожденные в приземном слое атмосферы; нижняя пластина принимает радиацию от почвы и окружающих предметов.

В Апатитах в дополнение к МТ в качестве вспомогательного датчика установлен флюксметр. Поскольку МТ чувствителен к заряженным частицам, то электрическое поле в атмосфере, возможно, может быть источником некоторых вариаций счета МТ, прежде всего для заряженных частиц, попадающих в верхнюю пластину. Такой же флюксметр планируется установить в Баренцбурге.

Нейтронный монитор чувствителен к частицам КЛ с энергией в единицы ГэВ, которые существенно отклоняются магнитным полем Земли от первоначального направления движения. Для НМ существует понятие — асимптотический конус (АК) приема (Дорман, 1975). Это совокупность таких направлений вхождения в магнитосферу Земли частиц, что после отклонения магнитным полем частицы оказываются над НМ. Направление зависит (при прочих равных условиях) от энергии частицы, так что АК представляет собой растянутую узкую полосу; для некоторых станций АК вытягивается по долготе на 90° и более. В силу особенностей магнитосферы Земли АК Апатитов и Баренцбурга сильно различаются при том, что географически эти станции не так уж далеко друг от друга. На рисунке 1 схематически показаны АК этих станций. Асимптотический конус Апатитов располагается обычно в низких широтах и отклонен к востоку. Приблизительно он находится южнее Индии над океаном, то есть НМ в Апатитах принимает потоки КЛ вблизи плоскости эклиптики. Баренцбург, благодаря расположению около магнитосферного каспа, имеет более короткий АК, располагающийся меридионально в пределах $40\text{--}60^\circ$ широты. Конечно, имеется в виду спокойное состояние магнитосферы, при магнитосферных возмущениях АК начинают деформироваться. Расчет АК для определенной даты и текущего состояния магнитосферы выполняется с помощью различных ее моделей. Современной и соответствующей реальной магнитосфере является модель Цыганенко-01 (Tsyganenko, 2002).

На частицы с энергией в десятки ГэВ магнитосфера Земли воздействует слабо, их отклонение от первоначального направления движения небольшое, так что можно принять, что геометрическое поле зрения МТ является также его конусом приема КЛ. Как ранее отмечалось, у мюонных телескопов поля зрения составляют ~ 1 ср, что соответствует конусам с углом при вершине $\sim 60^\circ$. В этом случае МТ Баренцбург принимает потоки КЛ из области северного полюса эклиптики, при этом полюс никогда не выходит из поля зрения этого МТ, а МТ Апатиты — из приполярной области с захватом полюса в поле зрения в некоторые части суток и сезоны.

Исходные данные требуют коррекции, поскольку потоки КЛ в глубине атмосферы зависят от ее состояния. Наклонная компонента зависит от атмосферного давления (Дорман, 1972). Методика вычисления барометрического коэффициента и внесения поправок давно разработана и применяется на всех НМ. Мюонная компонента зависит как от атмосферного давления, так и от распределения температуры в диапазоне высот от поверхности земли до 20–30 км (Дорман, 1972). Методика внесения поправок, связанных с температурным эффектом, разработана в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН) (Беркова, 2018). После внесения указанных исправлений можно использовать данные для анализа вариаций КЛ.

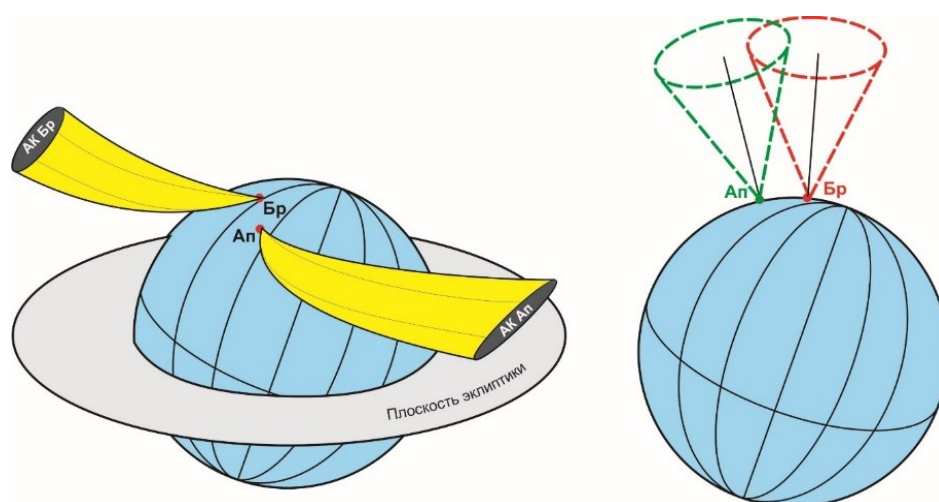


Рис. 1. Слева: схема расположения асимптотических конусов приема НМ. Красные точки на земном шаре — станции Апатиты (Ап) и Баренцбург (Бр). Желтые полосы обозначают совокупность траекторий частиц разных энергий в магнитосфере, а темные эллипсы с надписями: «АК Ап» и «АК Бр» — асимптотические конусы этих станций (области входа в магнитосферу). Справа: поля зрения мюонных телескопов в Апатитах и Баренцбурге: это просто конусы.

Наиболее существенным фактором, воздействующим на КЛ в гелиосфере, является солнечная активность. Космические лучи испытывают модуляцию в противофазе с солнечной активностью. По данным многолетних наблюдений (<http://pgia.ru/cosmicray>) амплитуда 11-летней вариации на полярных НМ составляет 12–15 %. Корональные выбросы масс, высокоскоростной солнечный ветер из корональных дыр могут приводить к снижению плотности потока КЛ в межпланетном пространстве примерно на такую же величину: 10–15 %. Другая причина вариаций — анизотропия КЛ в гелиосфере. Известны суточные вариации, 27-дневные, годовые. Их амплитуда составляет доли процента, редко 1–2 % (Дорман, 1963; Крымский и др., 1981). Выделить надежно такие вариации с меньшей на порядок амплитудой порой нелегко. Аномальная годовая вариация наблюдалась в начале 24-го цикла в 2010–2012 гг. (Балабин и др., 2015).

Одним из способов выделения малых вариаций может служить метод отношений. Солнечная активность в КЛ носит глобальный характер и проявляется на всех детекторах; в случае суточного усреднения можно говорить, что одновременно. В этом случае использование вместо темпов счета двух детекторов их отношения существенно снизит влияние общих глобальных факторов. Для этого метода желательно иметь идентичные детекторы на двух станциях. В нашем случае имеется две пары детекторов. На рисунке 2 приведены вариации темпов счета детекторов КЛ в Апатитах и Баренцбурге. Пара МТ начала работу в 2021 г., пока это весь объем данных по МТ. Профили НМ приведены почти с начала цикла, чтобы показать изменения потока КЛ с ростом солнечной активности.

По данным солнечной обсерватории ИЗМИРАНа, в конце 2019 г. начался 25-й цикл солнечной активности (<http://spaceweather.izmiran.ru/>). На протяжении 2020–2021 гг. активность Солнца нарастала медленно, что можно видеть по тому, что поток КЛ до конца 2021 г. по данным НМ примерно держался на одной уровне (рис. 2), а с началом 2022 г. начал быстро падать. За год изменение составило 4–5 % по данным НМ. Причем, многочисленные выбросы масс во второй половине года вызывали кратковременные падения интенсивности КЛ на 4 %. По данным МТ изменение потока КЛ за 2022 г. составили 2–3 %, а выбросы масс приводили к падению интенсивности на 2 %. Как видим, на обоих типах детекторов солнечная активность заметно проявилась. Также обращает внимание, что по данным НМ потоки КЛ примерно одинаково изменялись на обеих станциях, провал летом 2022 г. у них синхронный. В то же время по данным МТ в Баренцбурге поток КЛ уменьшился за 2022 г. не менее чем на 3 %, а по данным МТ в Апатитах — не более чем на 2 %. То есть можно утверждать, что на станциях и на разных детекторах поток КЛ с ростом солнечной активности изменяется по-разному. Но присутствие 27-дневной вариации, форбуш-понижения осложняют общую картину и смазывают общий эффект.

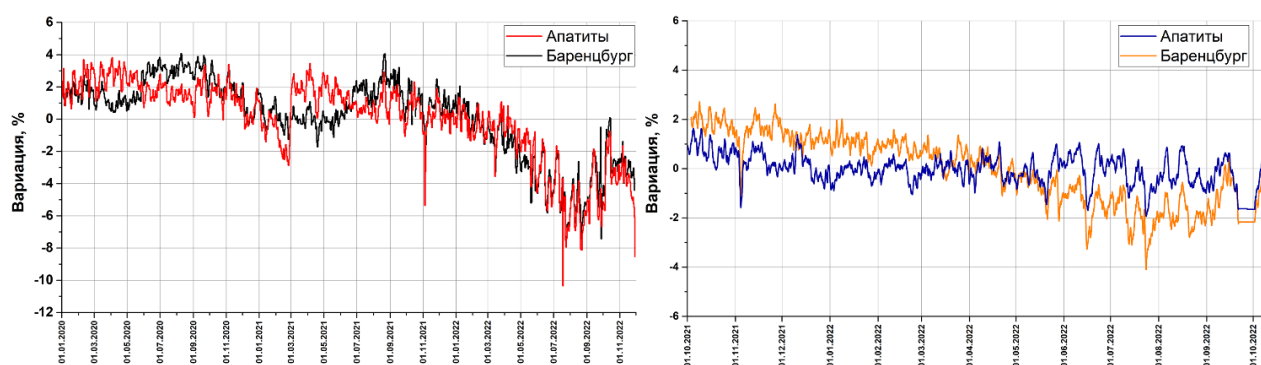


Рис. 2. Вариации счета детекторов КЛ в Апатитах и Баренцбурге. *Слева:* профили счета нейтронных мониторов. *Справа:* профили счета мюонных телескопов. Среднесуточные данные

Вычислим отношения по следующим выражениям:

$$\eta 1 = NM_{Ap} / NM_{Br}$$

и

$$\eta 2 = MT_{Ap} / MT_{Br},$$

где NM_{Ap} и NM_{Br} — темпы счета нейтронных мониторов в Апатитах и Баренцбурге соответственно, а MT_{Ap} и MT_{Br} — темпы счета мюонных телескопов.

На рисунке 3 представлены вариации величин $\eta 1$ и $\eta 2$. Метод отношений ранее применялся нами в работе (Балабин и др., 2021) для выделения малых вариаций на НМ в длинных рядах данных.

Известно, что электрические поля в облаках способны влиять на потоки заряженных частиц (мюонов, электронов и позитронов), возникающих в атмосфере как вторичные космические лучи. Этому вопросу посвящено немало работ как теоретического плана (Gurevich et al., 1992; Gurevich et al., 1999), так и практического (Alexeenko, 2002; de Mendonca, 2011). Во всех этих работах подразумевается грозовая активность, создающая сильные электрические поля между облаками. В Заполярье грозовая активность весьма редкое явление, поэтому напрямую указанные работы не могут быть использованы для мюонных телескопов в Апатитах и Баренцбурге. Тем не менее, согласно работе (Rust et al., 2002), электрические поля с напряженностью в десятки кВ/м присутствуют в слоисто-дождевых облаках в холодные сезоны. И хотя это во много раз меньше, чем напряженность электрического поля в грозовых облаках, исследовать возможный эффект влияния электрических полей в полярной атмосфере на потоки заряженных частиц стоит. Для этого в Апатитах в комплексную систему регистрации в 2023 г. добавлен флюксметр, аналогичный планируется установить и в Баренцбурге. На рисунке 4 представлен результат мониторинга напряженности электрического поля в атмосфере в Апатитах. За недолгий промежуток времени даже в условиях полярной зимы отмечены случаи напряженности электрического поля в несколько кВ/м.

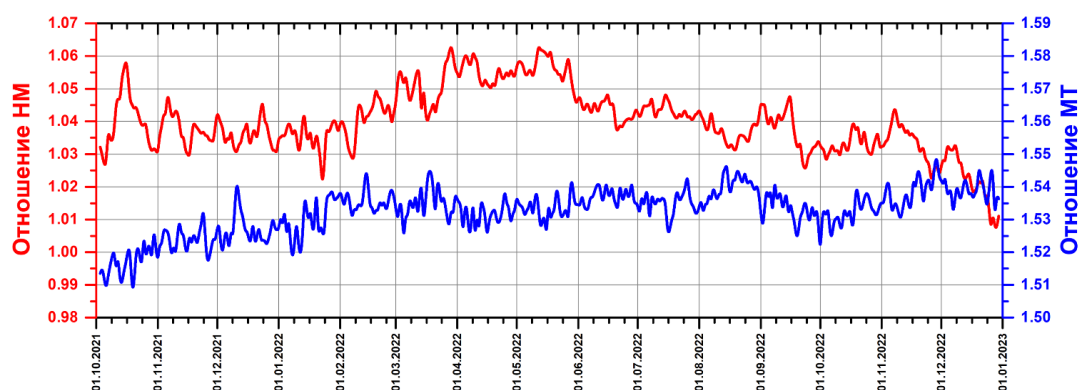


Рис. 3. Вариации отношения $\eta 1$ счета пары НМ (красный, левая шкала) и отношения $\eta 2$ пары МТ (синий, правая шкала) на станциях Апатиты и Баренцбург. Для вычисления отношений использованы суточные данные

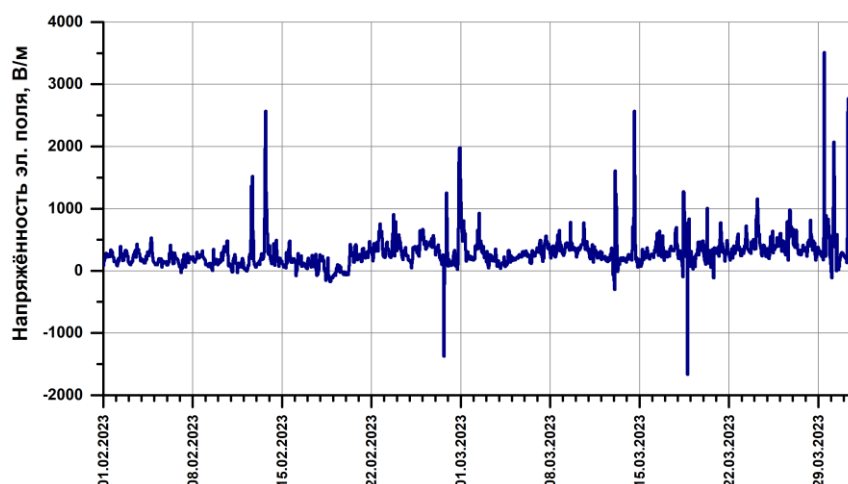


Рис. 4. Данные флюксметра в Апатитах за февраль – март 2023 г. Часовое усреднение

Обсуждение результатов и дальнейших исследований

Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что метод вычисления отношений работает. В начале ноября 2021 г. произошло первое за 25-й цикл значительное форбуш-понижение, вызвавшее падение счета НМ на $\sim 5\%$, а МТ — на 3% (рис. 2), однако, на рис. 3 значимое снижение отсутствует. В течение всего лета 2022 г. наблюдалось существенное снижение потока КЛ по данным НМ, а на рис. 3 в этот период никаких существенных вариаций величины η_1 не наблюдается. Метод отношений двух идентичных детекторов реально работает и позволяет устранить вариации, имеющие глобальный характер.

С другой стороны, практически незаметное по рис. 2 приращение счета НМ в Апатитах в период март – май 2022 г. оказало на величину η_1 достаточно сильное влияние (до 2%) от значения 1,04 до 1,06. Наиболее вероятной причиной является геомагнитный эффект, поскольку величина η_2 держится стабильно. Как упоминалось выше, на положение и форму АК НМ значительно влияет состояние магнитосферы. По данным OMNIWeb (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>), в эти месяцы наблюдались частые и длительные периоды низкой скорости солнечного ветра и плотности частиц, что приводит к расширению магнитосферы (Tsyganenko, 2002), взаимное расположение АК меняется.

Гораздо важнее, что на протяжении 2022 г. происходит медленный рост η_2 . Он небольшой, всего $\sim 0,5\%$, однако заметен. Состояние магнитосферы на прием КЛ мюонными телескопами оказывает эффект, однако направление приема (см. рис. 1) для обоих МТ несильно различаются, и на величине η_2 это не скажется. Это также не сезонный эффект, тогда был бы замечен период длиной в год или кратен меньше. Предположительно, это может быть проявление анизотропного влияния солнечной активности на гелиосферу (Гушина и др., 2014). Как возможный пример такого воздействия отметим гелиосферный токовый слой (ГТС) (Белов и др., 2002). В максимуме солнечной активности угол наклона ГТС составляет более 50° , а в минимуме он приближается к плоскости солнечного экватора. Очевидно, условия диффузии КЛ в гелиосферу в угле раскрытия ГТС и вне его будут различаться, поскольку различается крупномасштабная структура межпланетного магнитного поля. По поводу роста отношения η_2 более определенно можно будет сказать, проведя наблюдения хотя бы один цикл солнечной активности, то есть до конца 25-го цикла. Если будет отмечена цикличность изменения η_2 , это будет означать, что эффект существует в гелиосфере и межпланетном космическом пространстве, а не локальный эффект на станциях.

Весьма интересными представляются измерения электрического поля в полярной атмосфере. Несмотря на полное отсутствие грозовой активности и отрицательные температуры наблюдаются напряженности электрического поля до 3 кВ/м (рис. 4). Причем поле возникает обеих полярностей. Если принять, что протяженность этого поля в атмосфере по высоте такая же, как в облаках: $\sim 1\text{ км}$ (Chalmers, 1974; Матвеев, 1984), то мюоны в этом электрическом поле наберут дополнительно 3 МэВ . Немного, тем не менее это составляет 1% от энергии регистрируемых мюонов. Для потока мягких заряженных частиц, регистрируемых верхней пластиной МТ, эта дополнительно набранная в электрическом

поле энергия составит гораздо более 1 %. Есть уверенность, что небольшие вариации на поток мюонов и других заряженных частиц электрическое поле оказывает. Методом наложения эпох вполне четко выделяются вариации, составляющие доли процента, так что этот метод можно использовать для выделения вариаций в потоках частиц, связанных с электрическим полем. Для применения метода наложения эпох требуется иметь ряд однотипных событий. Наблюдение электрического поля в течение хотя бы одного года обеспечит необходимый ряд данных и появится возможность исследовать влияние электрических полей полярной атмосферы на потоки заряженных частиц КЛ.

Заключение

Пара одинаковых мюонных телескопов установлена на станциях космических лучей Апатиты и Баренцбург. На основе накопленных на период чуть больше года данных, полученных от мюонных телескопов, проведен анализ. Проверена работоспособность методики, предназначенной выделять малые вариации в данных мюонных телескопов на фоне более сильных известных вариаций. Результаты не противоречат всему ранее известному о вариациях космических лучей. Имеются указания, что в КЛ присутствует малая вариация, связанная с изменением анизотропии на протяжении 11-летнего цикла солнечной активности, однако измерений в течение одного года недостаточно для однозначных выводов. Установленный на станции Апатиты флюксметр зарегистрировал напряженность электрического поля в несколько кВ/м, что для полярной атмосферы и зимних условий много. Имеется возможность, собрав достаточно данных, провести комплексный анализ данных от разных детекторов для выявления влияния сильных электрических полей на потоки заряженных частиц в приземном слое атмосферы.

Список источников

1. Балабин Ю. В., Белов А. В., Гущина Р. Т. Годовые вариации космических лучей в 24-м солнечном цикле // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 5. С. 676–680. DOI 10.7868/S0367676515050105.
2. Балабин Ю. В., Белов А. В., Гущина Р. Т., Янке В. Г., Янковский И. В. О вариациях потока космических лучей в конце 24 цикла солнечной активности // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85, № 3. С. 321–325. DOI 10.31857/S0367676521030030.
3. Белов А. В., Гущина Р. Т., Обридо В. Н., Шелтинг Б. Д., Янке В. Г. Связь долговременной модуляции космических лучей с характеристиками глобального магнитного поля Солнца // Геомагнетизм и аэрномия. 2002. Т. 42, № 6. С. 727–735.
4. Беркова М. Д., Григорьев В. Г., Преображенский М. С., Зверев А. С., Янке В. Г. Температурный эффект мюонной компоненты, наблюдаемый на Якутском спектрографе космических лучей // Ядерная физика. 2018. Т. 81, № 6. С. 673–682. DOI 10.1134/S0044002718050045.
5. Гущина Р. Т., Белов А. В., Ерошенко Е. А., Обридо В. Н., Паорис Е., Шелтинг Б. Д. Модуляция космических лучей на фазе роста солнечной активности 24-го цикла // Геомагнетизм и аэрномия. 2014. Т. 54, № 4. С. 470–476. DOI 10.7868/S0016794014040063.
6. Дорман Л. И. Вариации космических лучей и исследование космоса, М.: Изд-во АН СССР, 1963, 1028 с.
7. Дорман Л. И. Метеорологические эффекты космических лучей, М.: Наука, 1972. 212 с.
8. Дорман Л. И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей, М.: Наука, 1975. 402 с.
9. Крымский Г. Ф., Кривошапкин П. А., Мамрукова В. П., Скрипин Г. В. Эффекты взаимодействия гелиомагнитосферы с галактическим полем в космических лучах // Геомагнетизм и аэрномия. 1981. Т. 21, № 5. С. 923–925.
10. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии, Л.: Гидрометеиздат, 1984, 752 с.
11. Мурзин В. С. Введение в физику космических лучей, М.: Изд-во МГУ, 1988. 320 с.
12. Хаякава С. Физика космических лучей. Ч. 1: Ядерно-физический аспект; ч. 2: Астрофизический аспект., М.: Наука, 1974. 1042 с.
13. Alexeenko V. V., Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., Petkov V. B. Transient variations of secondary cosmic rays due to atmospheric electric field and evidence for pre-lightning particle acceleration // Phys. Lett. A. 2002. V. 301, Iss. 3–4. P. 299–306. DOI 10.1016/S0375-9601(02)00981-7.
14. Chalmers J. A. Atmospheric Electricity 2nd edition, Pergamon Press, Oxford. 1974. 423 p.

15. de Mendonca R. R. S., Raulin J.-P., Bertoni F. C. P., Echer E., Makhmutov V. S., Fernandez G. Long-term and transient time variation of cosmic ray fluxes detected in Argentina by CARPET cosmic ray detector // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2011. V. 73. P. 1410–1416. DOI 10.1016/j.jastp.2010.09.034.
16. Gurevich A. V., Milikh G. M. Generation of X-rays due to multiple runaway breakdown inside thunderclouds // *Phys. Lett. A*. 1999. V. 262, Iss. 6. P. 457–463. DOI 10.1016/S0375-9601(99)00695-7.
17. Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // *Phys. Lett. A*. 1992. V. 165, Iss. 5–6, P. 463–468. DOI 10.1016/0375-9601(92)90348-P.
18. Rust W. D., Trapp R. J. Initial balloon soundings of the electric field in winter nimbostratus clouds in the USA // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. P. 1959–1962. DOI: 10.1029/2002GL015278.
19. Tsyganenko, N. A., A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. Iss. 8. P. SMP 12-1–SMP 12-15. DOI 10.1029/2001JA000219.

References

1. Balabin JuV., Belov A. V., Gushhina R. T. Godovye variacii kosmicheskikh luchey v 24-m solnechnom cikle [Annual variations of cosmic rays in the 24th solar cycle]. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja* [Bulletin of the RAS: Physics], 2015, vol. 79, no. 5, pp. 676–680. (In Russ.).
2. Balabin Ju. V., Belov A. V., Gushhina R. T., Janke V. G., Jankovskij I. V. O variacijah potoka kosmicheskikh luchey v konce 24 cikla solnechnoj aktivnosti [On variations in the cosmic ray flux at the end of the 24th cycle of solar activity]. *Izvestija RAN. Serija fizicheskaja* [Bulletin of the RAS: Physics], 2021, vol. 85, no. 3, pp 321–325. (In Russ.).
3. Belov. A. V., Gushhina R. T., Obridko V. N., Shelting B. D., Janke V. G. Svjaz' dolgovremennoj moduljarii kosmicheskikh luchey s karakteristikami global'nogo magnitnogo polja Solnca [Relationship between long-term modulation of cosmic rays and the characteristics of the global magnetic field of the Sun]. *Geomagnetizm i ajeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy], 2002, vol. 42, no. 6, pp. 727–735. (In Russ.).
4. Berkova M. D., Grigor'ev V. G., Preobrazhenskij M. S., Zverev A. C., Janke V. G. Temperaturnyj jeffekt mjuonnoj komponenty, nabljudajemyj na Jakutskom spektrografe kosmicheskikh luchey [Temperature effect of the muon component observed with the Yakutsk cosmic ray spectrograph]. *Jadernaja fizika* [Physics of Atomic Nuclei], 2018, vol. 81, no. 6, pp. 776–785. (In Russ.).
5. Gushhina R. T., Belov A. V., Eroshenko E. A., Obridko V. N., Paoris E., Shelting B. D. Moduljacija kosmicheskikh luchey na faze rosta solnechnoj aktivnosti 24-go cikla [Cosmic ray modulation during the growth phase of solar activity of the 24th cycle]. *Geomagnetizm i ajeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy], 2014, vol. 54, no. 4, pp. 470–476. (In Russ.).
6. Dorman L. I. *Variacii kosmicheskikh luchey i i ssledovanie kosmosa* [Variations of cosmic rays and space exploration]. Moscow, Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1963, 1028 pp. (In Russ.).
7. Dorman L. I. *Meteorologicheskie efekty kosmicheskikh hluchey* [Meteorological effects of cosmic rays]. Moscow, Nauka publ., 1972, 212 p. (In Russ.).
8. Dorman L. I. *Eksperimental'nye i teoreticheskie osnovy astrofiziki kosmicheskikh luchey* [Experimental and Theoretical Foundations of Astrophysics of Cosmic Rays]. Moscow, Nauka publ., 1975, 402 p. (In Russ.).
9. Krymsky G. F., Krivoschapkin P. A., Mamrukova V. P., Skripin G. V. Effekty vzaimodejstviya geliomagnitosfery s galakticheskim polem v kosmicheskikh luchah [Effects of interaction of the heliomagnetosphere with the galactic field in cosmic rays]. *Geomagnetizm i ajeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy], 1981, vol. 21, no. 5, pp. 923–925. (In Russ.).
10. Matveev L. T. *Kurs obshchej meteorologii* [Course of general meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 752 p. (In Russ.).
11. Murzin V. S. *Vvedenie v fiziku kosmicheskikh luchey* [Introduction to the physics of cosmic rays]. Moscow, Publishing House of Moscow State University, 1988, 320 p. (In Russ.).
12. Hajakava S. *Fizika kosmicheskikh luchey*. Ch. 1: Jaderno-fizicheskij aspekt; ch. 2: Astrofizicheskij aspekt [Physics of cosmic rays. Part 1: Nuclear-Physical Aspect; part 2: Astrophysical aspect]. Moscow, Nauka Publ, 1974, 1042 p. (In Russ.).
13. Alexeenko V. V., Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., Petkov V. B., Transient variations of secondary cosmic rays due to atmospheric electric field and evidence for pre-lightning particle acceleration. *Phys. Lett. A*, 2002, vol. 301, iss. 3–4, pp. 299–306.
14. Chalmers J. A., *Atmospheric Electricity* 2nd edition. Oxford, Pergamon Press, 1974, 423 p.

15. de Mendonca R. R. S., Raulin J.-P., Bertonni F. C. P., Echer E., Makhmutov V. S., Fernandez G., Long-term and transient time variation of cosmic ray fluxes detected in Argentina by CARPET cosmic ray detector. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, vol. 73, pp. 1410–1416.
16. Gurevich A. V., Milikh G. M., Generation of X-rays due to multiple runaway breakdown inside thunderclouds. *Phys. Lett. A.*, 1999, vol. 262, iss. 6, pp. 457–463.
17. Gurevich A. V., Milikh G. M., Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm. *Phys. Lett. A.*, 1992, vol. 165, iss. 5–6, pp. 463–468.
18. Rust W. D., Trapp R. J., Initial balloon soundings of the electric field in winter nimbostratus clouds in the USA. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29, pp. 1959–1962.
19. Tsyganenko, N. A., A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry: 1. Mathematical structure. *J. Geophys. Res.*, 2002, vol. 107, iss. 8, pp. 12–15.

Информация об авторах

Юрий Васильевич Балабин — кандидат физико-математических наук, зав. лабораторией, <https://orcid.org/0000-0002-1256-6728>;

Алексей Владимирович Германенко — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5129-9426>;

Евгений Александрович Маурчев — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2028-4613>;

Евгения Александровна Михалко — инженер, <https://orcid.org/0000-0002-1534-9614>;

Борис Борисович Гвоздевский — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1643-798X>.

Information about the authors

Yury V. Balabin — Ph.D., head. laboratory. <https://orcid.org/0000-0002-1256-6728>;

Alexey V. Germanenko — Ph.D., researcher. <https://orcid.org/0000-0001-5129-9426>;

Evgeniy A. Mauricev — Ph.D., senior researcher. <https://orcid.org/0000-0003-2028-4613>;

Evgeniya A. Mikhalko — engineer. <https://orcid.org/0000-0002-1534-9614>;

Boris B. Gvozdevsky — Ph.D., researcher. <https://orcid.org/0000-0003-1643-798X>.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 17.04.2023; принята к публикации 03.05.2023.
The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 17.04.2023; accepted for publication 03.05.2023.