УДК 53.03

Научная статья

Проникновение отрицательного заряда из ионосферы в землю, на фоне магнитосферной бури

**Н. С. Хаердинов¹, Д. Д. Джаппуев¹, К. Х. Канониди², А. У. Куджаев¹,
А. С. Лидванский¹, В. Б. Петков¹, М. Н. Хаердинов¹**

¹ Институт ядерных исследований РАН, 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

² Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, 108840, Россия, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4

E-mail: KhaerdinovNS@yandex.ru

Во время магнитосферной бури 22.06.2015, сопровождаемой Форбуш – понижением, отдельные установки, регистрирующие космические лучи на уровне земли, зафиксировали положительное возмущение интенсивности частиц в период 19:00 – 22:00 UT. В работе приводится регистрация указанного всплеска на территории Кавказских гор установкой «Ковёр» БНО ИЯИ РАН. Приводится экспериментальное свидетельство медленного спуска в этот период большого отрицательного заряда с ионосферы на землю.

Ключевые слова: космические лучи, убегаящие электроны, магнитосферно-ионосферные суббури, атмосферное электричество, сейсмическая активность, предвестники землетрясений.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-193-206

Поступила в редакцию: 22.10.2020

В окончательном варианте: 05.02.2021

Для цитирования. Хаердинов Н. С., Джаппуев Д. Д., Канониди К. Х., Куджаев А. У., Лидванский А. С., Петков В. Б., Хаердинов М. Н. Проникновение отрицательного заряда из ионосферы в землю, на фоне магнитосферной бури // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2021. Т. 34. № 1. С. 193-206. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-193-206

Контент публикуется на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Хаердинов Н. С. и др., 2021

Введение

В работе [1] сообщалось, о регистрации мюонным телескопом GRAPES-3 [11,4°N, 76,7°E] 2-х часового возрастания интенсивности мюонов в 19:00 UT 22 июня 2015 г. в разгар продолжающегося Форбуш–понижения. В ходе анализа было высказано предположение, что причиной всплеска явилось снижение порога геомагнитного обрезания, вызванное ослаблением геомагнитного поля из-за пересоединения с возмущённым межпланетным. В качестве одного из главных свидетельств в

Финансирование. Исследование выполнялось без финансовой поддержки фондов.

пользу такого утверждения выступала высокая степень автокорреляции временных профилей модуля межпланетного магнитного поля и вариаций мюонов. В работе группы исследователей [2] такая концепция была подвергнута критике. В качестве аргументов были предъявлены свидетельства локальности эффекта в регистрации всплеска нейтронными мониторами мировой сети, в то время как результаты расчётов, основанные на широко используемой модели Цыганенко [3], показывают его глобальность. Например, европейские станции, согласно расчёту, должны были иметь самые сильные изменения порога геомагнитного обрезания, но большинство из них не регистрировали всплеск. Была высказана альтернативная версия – кратковременно наблюдаемая анизотропия в межпланетном пространстве. Высказана необходимость более подробного рассмотрения события, с целью отделения возмущений порога геомагнитного обрезания, предсказываемых традиционными моделями от возмущений, сформированных вне их рамок.

Ниже, представлен экспериментальный материал регистрации указанного всплеска мюонной интенсивности, полученный на базе установки «Ковёр» Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН, где в течение ряда лет изучаются вариации космических лучей во время гроз. По вариациям оценивается электрическое состояние атмосферы в радиусе ~ 10 км. Регистрируются и другие геофизические параметры. Для события 22.06.2015 приводится их сравнительный анализ.

Описание установки и экспериментальной базы

Установка расположена на Северном Кавказе (географические координаты: 43.3°N, 42.7°E), в низине горного ущелья, на высоте 1.7 км над уровнем моря, в 40 м. от реки. Соседние вершины гор (4 км над уровнем моря) находятся на расстоянии 4–5 км.

Ведётся непрерывная регистрация интенсивности вторичных частиц космических лучей, атмосферного давления, приземной температуры и напряжённости электрического поля (прибор EFM100 фирмы Voltec, диапазон измерений ± 20 кВ·м⁻¹, положительное поле направлено к земле, разрешение 10 В·м⁻¹). Регистрируется электрический ток дождя (диапазон измерения ± 28 нА·м⁻², разрешение 55 пА·м⁻² постоянная интегрирования 21 с) и импульсные электромагнитные помехи.

В 4.5 км от базовой установки в горизонтальном горном тоннеле расположен измерительный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, описание которого дано в [4]. В работе используются данные наклономерной станции, которая представлена двумя прецизионными маятниковыми наклономерами, измеряющими угол наклона плоскости постаментов к плоскости горизонта в направлениях Восток-Запад и Север-Юг. Превышение над горизонтом соответствует положительному значению датчиков. Уровень выходного электрического сигнала ± 0.2 (В·с дуги⁻¹). Порог чувствительности 10^{-4} с дуги·мВ⁻¹. Период собственных колебаний маятника 1–50 секунд.

Для непрерывной регистрации оптического свечения над установкой два внешних пункта видео регистрации просматривают область неба с расстояния 0.5 км (п. Нейтрино, 20°– 65° над горизонтом, преимущественное направление -- на юг) и 75 км (село Хасанья, 0°– 50° над горизонтом, преимущественное направление на запад). В каждом пункте регистрация проводится двумя камерами в цветном (камера

Cs280) и инфракрасном (камера Cs265) диапазонах. Для выделения распределения свечения по высоте вся фотография делится на три горизонтальные области: верхняя «ионосфера», средняя «стратосфера» и нижняя «тропосфера». Для сравнения с фоном при обработке фотография делится на три равные вертикальные зоны: «левую», «правую» и «центр». При количественном анализе определяется средняя яркость пикселей локальных областей на фотографии. Для пересчёта яркости пикселей в яркость свечения неба была произведена калибровка видео камер.

Метод оценки электрического состояния грозовой атмосферы по вариациям вторичных частиц космических лучей

В рамках задачи исследования электрического состояния грозовой атмосферы в радиусе ~ 10 км по вариациям вторичных частиц космических лучей используется материал регистрации одиночных частиц мягкой и жёсткой компоненты отличающихся по проникающей способности. Регистрация осуществляется на базе сцинтилляционных детекторов. Элементарный детектор представляет из себя сварной алюминиевый контейнер со сторонами $70 \times 70 \times 30$ см³, заполненный жидким сцинтиллятором на основе уайт – спирита (плотность 0.78 г · см⁻³). Внутренние стенки контейнера покрыты диффузно отражающей эмалью (коэффициент отражения 0.8). Заряженная, релятивистская частица при движении в рабочем веществе теряет энергию, с плотностью потерь ~ 2 МэВ · (г · см⁻²)⁻¹, вызывая сцинтилляционную вспышку, пропорционально затраченной энергии. Большинство частиц – вертикальные, проходя сквозь детектор, выделяют в его рабочем веществе около 50 МэВ. Сверху контейнера расположен иллюминатор, сквозь который прямые и отражённые фотоны сцинтилляционной вспышки, попадают на катод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ-49). Характерное время «сбора» фотонов с детектора 30 нс. ФЭУ-49 при поданном напряжении 1.6 кВ имеет коэффициент усиления 10^5 . В результате, на выходе делителя напряжения, при нагрузке 75 Ом, появляется аналоговый электрический импульс (~ 30 мВ) пропорциональный пробегу заряженной частицы в детекторе с точностью не хуже $\pm 20\%$. В эксперименте элементарные детекторы плотно составлены в группы, а сигналы с детекторов поступают на аналоговый сумматор, где амплитуды складываются. В случае прохождения сквозь группу детекторов энергичной частицы под большим углом к зениту, сигналы одновременно сработавших детекторов складываются, и на выходе сумматора имеется сигнал, в первом приближении пропорциональный суммарному пробегу частицы в рабочем веществе всех задетых детекторов. Таким образом, поскольку толщина детекторов везде одинакова, амплитуда энергосвечения оказывается связанной с углом прихода проникающей частицы.

Регистрация частиц производится в двух вариантах: на улице, в фанерных домиках (суммарная толщина крыши 1 г · см⁻²) и в здании с бетонной крышей (29 г · см⁻²). Мягкая компонента регистрируется на улице (суммарная площадь детекторов 54 м², с 2017г — 45 м²), в интервале энергосвечений: 10 – 30 МэВ. Её состав: 56% это гамма - кванты, 31% - электроны и позитроны, 13% мюоны. Суммарная интенсивность регистрации – 80 с⁻¹ · м⁻². Вариации мягкой компоненты поправляются на вариации жёсткой, с целью выделить в чистом виде вариации электронно — фотонной компоненты. Соответствующие коэффициенты регрессии

получены ранее в результате корреляционного анализа. Энергичные частицы мягкой компоненты регистрируются по поглощению частиц с энерговыделением более 30 МэВ в бетонной крыше здания, выделяя разницу интенсивностей регистрации частиц на улице и в здании.

Для регистрации жёсткой компоненты используется группа «Ковёр», 20×20 детекторов (196 м^2) размещённая в здании. Порог энерговыделения 30 МэВ. Её состав: 83% это мюоны с энергией более 100 МэВ (с учётом энергетических потерь в крыше), 10% – электроны и позитроны, 7% гамма–кванты. Суммарная интенсивность счёта $211 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. При таких условиях, во время гроз, основной канал возмущений темпа регистрации это мюонная – проникающая компонента. Вариации электронно – фотонной компоненты с энергией более 30 МэВ, практически отсутствуют. В редких случаях их наличия, обнаруживаемого по каналам мягкой компоненты, есть возможность коррекции вариаций.

Зависимость энерговыделения от угла прихода частиц позволяет выделить из всего потока жёсткой компоненты частицы с направлением близким к вертикальному. Такие частицы имеют малое энерговыделение: 30 – 60 МэВ. В дальнейшем эту часть называем «вертикальными». Выделяя из всего потока четверть с максимальным энерговыделением (более 70 МэВ), приходящими с зенитными углами, превышающими $\sim 50^\circ$, называем их «периферийными». Вариации темпа счёта этих двух каналов информации по космическим лучам, под действием электрического поля в атмосфере и используются при анализе электрического состояния атмосферы. Теоретический анализ связи вариаций мюонов с разностью потенциалов в тропосфере в зависимости от зенитного угла приведён в [5]. В работах [6, 7] изложен метод определения по вариациям вертикальных и наклонных (периферийных) мюонов разности потенциалов в тропосфере над установкой и на периферии, в удалении $\sim 15 \text{ км}$ по кругу (от ~ 10 до $\sim 20 \text{ км}$). Ошибка метода $\sim 20\%$. Возможность такого использования вариаций мюонов обусловлена тем, что мюоны, регистрируемые на уровне земли с энергией 100 МэВ, в среднем, множественно рождаются на высоте тропопаузы ($\sim 200 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, что соответствует 13 км над уровнем моря) от частиц первичных космических лучей с энергией более 10 ГэВ. Согласно исследованию глобальной электрической цепи проведённому в работе [8] разность потенциалов между ионосферой и землёй 0.25 МВ. При изменении энергии мюонов на эту величину по всему спектру, на регистрацию их интенсивности это скажется мало. Но этот суммарный потенциал может быть суммой разностей потенциалов одинакового значения, но разного знака. Оценка максимальной разности потенциалов в стратосфере $\Phi \approx 400 \text{ МВ}$. Эффект от смещения спектра мюонов, с порогом 100 МэВ при регистрации, на величину 400 МэВ будет значительным, а эффект от смещения спектра первичных частиц с порогом 10 ГэВ на эту величину – пренебрежимо мал. При анализе вариаций наклонных мюонов учитывается действие поля, искривляющее траекторию. Поскольку регистрируемые мюоны вне зависимости от угла в среднем рождаются примерно на одной высоте, но при разном удалении от центра, то геометрически, и поля в тропосфере, влияющие на них, имеют разные области.

Теоретический метод оценки грозового поля предполагает отсутствие в данных иных вариаций. Для этого, например, вносится коррекция в данные на влияние давления. Но влияние вариаций температуры средних слоёв атмосферы пока не учитывается, как и вариации первичного спектра космических лучей. Метод работает в приближении квазистационарного состояния температуры и первичного

спектра. В случаях, когда быстрые вариации первичных частиц очевидны, оценивать разность потенциалов количественно смысла нет. Но качественную сторону проследить можно. В силу положительно заряженных частиц первичного спектра, положительных мюонов на уровне земли примерно на 20% больше чем отрицательных. При прохождении тропосферы при положительном поле, мюоны теряют энергию меньше, и регистрируется частиц на уровне земли больше. Соответственно, если отрицательный атмосферный заряд, формирует отрицательную разность потенциалов, находясь выше среднего уровня генерации мюонов, на уровне земли мы увидим уменьшение. Для мюонов с кинетической энергией ~ 100 МэВ (масса покоя 105 МэВ), большую роль играет нелинейность функции выживания, поскольку они распадаются с постоянной 2.2 мкс в собственной системе отсчёта. Суть эффекта в том что при любом знаке поля более тормозящаяся часть мюонов более эффективно распадается. Это приводит к отрицательной квадратичной зависимости возмущения интенсивности вертикальных мюонов от разности потенциалов в тропосфере. С ростом положительного поля, отрицательный квадратичный эффект растёт быстрее линейного, и приводит к ограничению амплитуды возрастания интенсивности в районе $\sim 0.5\%$. Этим фактом можно пользоваться при оценках степени возмущённости первичного спектра на фоне грозových полей.

Калибровка видеокамер

Для определения функциональной связи яркости свечения удаленной непрерывной поверхности со средней яркостью пикселей его изображения на фотографии, была выполнена прямая калибровка. При этом, для получения соответствующих значений предельно низкой яркости свечения использовался метод гашения – при котором яркость известного источника ослабляется на известную величину. В качестве источника использовались светодиоды с известной силой света и длиной волны 405, 430, 525, 630, 940 (нм) с точностью 30 нм. Порог чувствительности определяют шумы фотоприёмника (КМОП матрицы). Объектив осуществляет фокусировку светового потока на него. Расчёт освещённости источником области матрицы производился по законам геометрической оптики. Это значение соответствует истинному в случае идеально настроенной резкости изображения, чего на практике достичь невозможно. При сохранении светового потока вариация резкости изображения приводит к его «размытию» по поверхности матрицы, уменьшая освещённость, но увеличивая площадь изображения. Механическая процедура настройки резкости вариофокальным объективом позволяет применить метод гашения. Коэффициент ослабления освещённости при этом равен кратному увеличению площади изображения источника относительно его «идеального», рассчитываемого теоретически. Когда диапазона ослабления было недостаточно для достижения порога чувствительности, менялось время экспозиции. В результате калибровки установлена функциональная связь между поверхностной яркостью источника (разного цвета) освещающего объектив камеры и средней яркостью пикселей его изображения на снимке. Минимальное значение освещённости, при которой статистическими методами выделяется на фоне шумов изображение размером порядка площади снимка, эмитированное в эксперименте $\sim 10^{-10}$ люкс (заявлено

в паспорте 0.01 л). Благодаря внутренним настройкам видеокамер, зависимость имеет экспоненциальный характер, зависящий от цвета, что ведёт к трансформации цветопередачи. Кроме того, при передаче цвета определённой длины волны осуществляется его RGB представление. То есть, разложение цвета на три составляющие – красный, зелёный и синий. При малых значениях видеосигнала остаётся лишь главная компонента. В результате проделанной калибровки восприимчивости камер, представленной на рис. 1 и рис. 2, появилась возможность количественно оценить цвет и яркость наблюдаемых в эксперименте свечений.

Рис. 1. Калибровка видеокамер. Яркость пикселей (ось ординат) изображения источника свечения на снимке, выраженной в каналах (0-255) в зависимости от интенсивности (яркости) свечения поверхности, выраженной в рэлях [Рл].

а) Калибровка видеокамеры Cs280 в цветовом разрешении. Красные кружки — зависимость для красного цвета (630 нм). Зелёные ромбы — для зелёного цвета (525 нм). Синие квадраты — для синего (430 нм). Фиолетовые квадраты — для фиолетового (405 нм). б) Калибровка видеокамеры Cs265, используемой в черно-белом разрешении в «ночном» режиме с регистрацией в инфракрасном диапазоне. Красные полые кружки — зависимость отклика видеосигнала на освещение красным цветом (630). Зелёные ромбы — отклик на освещение зелёным (525 нм). Синие квадраты — освещение синим (430 нм). Фиолетовые закрашенные квадраты — отклик камеры на освещение фиолетовым (405 нм). Красные закрашенные кружки — отклик на освещение инфракрасным источником (940 нм).

Так, для события 10.06.2015, опубликованного в [9] характерное фоновое свечение области ионосферы над грозой: красным цветом (R): 2.45 кРл, зелёным (G): 8.14 кРл, синим (B): 23.51 кРл. Или в фотометрических единицах соответственно R: $1.12 \cdot 10^{-4}$ [кд·м⁻²], G: $1.32 \cdot 10^{-3}$ [кд·м⁻²], B: $6.85 \cdot 10^{-5}$ [кд·м⁻²]. Эти оценки сравнимы с известным значением яркости перистых облаков, освещённых луной ~ 10 кРл.

Рис. 2. Калибровка видеокамер. Яркость пикселей (ось ординат) изображения источника свечения на снимке, выраженной в каналах (0–255) в зависимости интенсивности (яркости) свечения поверхности, выраженной в единицах кандела на квадратный метр [$\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$].

Калибровка видеокамеры Cs280 в цветовом разрешении (закрашенные значки, аппроксимация тонкими линиями). Красные кружки – зависимость для красного цвета (630 нм). Зелёные ромбы – для зелёного цвета (525 нм). Синие квадраты – для синего (430 нм). Фиолетовые квадраты – для фиолетового (405 нм).

Калибровка видеокамеры Cs265, используемой в черно-белом разрешении в «ночном» режиме (полые значки, аппроксимация толстыми линиями). Красные кружки – отклик видеосигнала на освещение красным цветом (630). Зелёные ромбы – отклик на освещение зелёным (525 нм). Синие квадраты – освещение синим (430 нм). Фиолетовые квадраты – отклик камеры на освещение фиолетовым (405 нм).

Сама амплитуда свечения, коррелирующего с разностью потенциалов в стратосфере: R: 0.42 кРл, G: 1.58 кРл, B: 4.33 кРл. Или в фотометрических единицах соответственно R: $1.92 \cdot 10^{-5}$ [$\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$], G: $2.55 \cdot 10^{-4}$ [$\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$], B: $1.26 \cdot 10^{-5}$ [$\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$]. Это сравнимо с яркостью млечного пути (1 кРл). Из данных следует, что воспринимается глазом зелёный цвет, хотя синих фотонов в три раза больше. Нужно отметить повышенную чувствительность КМОП-матрицы, используемой в ночном режиме (без фильтра) к фиолетовой части оптического спектра. Характерная ошибка измерения $2^{\pm 1}$ определяется точностью автоматической подстройки электроники видеокамеры в стандартный режим наблюдения, например после «ослепления» яркими молниевыми вспышками. Характерное значение вариаций яркости свечения, коррелирующего с возмущением интенсивности энергичных частиц $\sim 10^{-3}$ [$\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$], или 1–10 кРл для вариации интенсивности фотонов зелёного цвета.

Проникновение отрицательного заряда из ионосферы в землю, на фоне магнитосферной бури

Во время магнитосферной бури 22.06.2015, внезапное начало которой совпало с землетрясением в Эгейском море (36.79°N 27.84°E 22.06.2015, 18:33:54 UT, 2 км, M2.1, <https://www.emsc-csem.org/Earthquake>), и сопровождалась Форбуш – понижением, над установкой проходила гроза. Отрицательная приземная напряжённость начала рост с момента 21:46:10 местного времени (LT), опережающего мировое (UT) на 3 часа (рис. 3). Далее, везде в статье, приводятся моменты в местном времени, если нет специального указания. Электрическое состояние атмосферы было классифицировано как грозовое по росту давления, регистрации приземной напряжённости поля с амплитудой более $2 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$ (до $5 \text{ кВ} \cdot \text{м}^{-1}$), импульсного разряда в момент 21:51:10, сопровождаемого резким спадом напряжённости приземного поля до нулевого значения, характерным для молниевых разрядов облако – земля. Начиная с 19:22:20 было резкое усиление отрицательного тока дождя до $-27 \text{ нА} \cdot \text{м}^{-2}$, с 19:45:30 показания превысили предел шкалы $-28 \text{ нА} \cdot \text{м}^{-2}$. На рисунках приведены графики вариаций мюонной интенсивности («вертикальные» и «периферийные» частицы), и электронно–фотонной (10–30 МэВ). В более подробном временном разрешении информация представлена на рис. 4. С целью исключения из анализа медленных вариаций представленная на графиках мюонная интенсивность поправлена на тренд по периоду 18:00 – 22:00, предшествующему быстрым вариациям. В период максимума отрицательного приземного поля, уверенно регистрируется положительное возмущение мюонной интенсивности на уровне +1.5%, что значительно больше предельного значения для вариаций чисто электрического происхождения. То есть, наши данные не противоречат выводу работы [1], что в период, начиная примерно с 22:00 наземными установками регистрировался всплеск частиц. Но, существует важное отличие, у нас это возмущение растёт с момента 21:51:50 до 21:58:50 (18:58:59 UT), после чего волнообразно падает. В статье [10] приводится график регистрации возмущения интенсивности, с более детальным разделением по направлениям, соответственно и по жёсткости. Начало проявляется у всех примерно в 18:45–18:50 UT, близко к нашему, но максимум достигается в 19:50–20:0 UT. Причиной такого волнообразного падения у нас (1 – 2 %), на фоне предполагаемого роста, может явиться появление отрицательного электрического поля в тропосфере. На это указывает и знак приземного поля, и возмущение электронно–фотонной компоненты, отвечающее ускорению электронов вниз, излучающих тормозные гамма–кванты, с энергией не превышающей 30 МэВ. Такой ограниченный спектр характерен для генерации фотонов лавинами убегающих электронов. Удалённой видео камерой в с. Хасанья (75 км) было зарегистрировано свечение неба над установкой в период их генерации 21:51:00 – 22:08:00 (см. рис. 4, панель 5), хотя условия были сложными для этого, луна просвечивала сквозь облачность, создавая фоновое свечение. На рисунке 4 также приведены данные наклономера. Нужно отметить, наклономер в этот период работал нестабильно, эпизодически переключаясь во внештатный режим. Такое скачкообразное изменение коэффициента усиления сигнала возникло по причине неудачной настройки параметров прибора.

Начиная с момента 22:25 началось динамичное развитие событий. После небольшого сейсмического возмущения, отмеченного наклономером, его показания наклона резко изменились, после чего процесс измерения вошёл в штатный

режим. При этом, интенсивность «вертикальных» частиц начинает падать вплоть до значений ниже фонового, отвечая сильному росту отрицательного поля в тропосфере. Процесс сопровождается и ростом отрицательной приземной напряжённости, генерацией гамма-квантов и слабым свечением, зарегистрированным в Хасанье. Луна при этом уже не подсвечивала, скрывшись за горизонт. Начиная с момента 22:32:00, генерация гамма-квантов резко падает. Такой же эффект заметен в яркости свечения неба в области «тропосфера» по наблюдению из с. Хасанья. Опускающийся далее атмосферный заряд, приближаясь к земле, усилил экспоненциально напряжённость приземного поля, после чего произошёл импульсный разряд длительностью 40 с. В этот момент 22:34:28, наклономер, зарегистрировал «горный удар», то есть маленькое сотрясение горы. Последующий короткий положительный всплеск приземной напряжённости, повидимому, отвечает уходящим токам по земле. Нужно отметить, что шумовой канал этот эффект не зафиксировал, что бывает при медленных или горизонтальных разрядах. Время спуска заряда из ионосферы на землю 9.5 минут. После чего поле в атмосфере стало восстанавливаться.

Были произведены количественные оценки амплитуды свечений. Фоновая яркость ночного неба, измеренная в цвете камерой Cs280 в с. Хасанье имеет следующие характеристики. Красный цвет (R): $149 \cdot (2^{\pm 1})$ Рл, зелёный (G): $802 \cdot (2^{\pm 1})$ Рл, синий (B): $1.25 \cdot (2^{\pm 1})$ кРл. В фотометрических единицах, соответственно, R: $6.76 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-6}$ [кд·м⁻²], G: $1.30 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-4}$ [кд·м⁻²], B: $3.64 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-6}$ [кд·м⁻²]. Суммарно: $1.4 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-4}$ [кд·м⁻²]. Это значение соответствует обычной яркости ночного безлунного неба.

Для первого периода генерации гамма-квантов, около 22:00, амплитуда возмущения свечения в единицах отношения к фону. R: 1.081 ± 0.009 G: 1.071 ± 0.008 B: 1.097 ± 0.010 . В единицах интенсивности фотонов (по результатам калибровки). R: $12 \cdot (2^{\pm 1})$ Рл, G: $57 \cdot (2^{\pm 1})$ Рл, B: $121 \cdot (2^{\pm 1})$ Рл. В фотометрических единицах. R: $5.5 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-7}$ [кд·м⁻²], G: $0.92 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-5}$ [кд·м⁻²], B: $3.52 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-7}$ [кд·м⁻²]. Суммарно: $1.01 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-5}$ [кд·м⁻²]. Визуально это не заметно.

Для второго периода генерации гамма-квантов, около 22:30, было определено, что эффект видимого на графике свечения дали отдельные световые вспышки, – вероятность имитации которых случайным процессом равна 1/36. Это значит, что случайное попадание шумовых всплесков в наперёд заданный интервал максимума генерации гамма-квантов, нужно ждать в среднем больше месяца. Что касается амплитуды яркости, то можно заметить, для наиболее значимых всплесков свечения отношение к фону имеет тот же порядок что и для первого события в 22:00. Поскольку фон сильно не изменился то, с точностью калибровочных измерений яркость свечения та же.

Обсуждение

Несмотря на явные элементы регистрации грозы, имеются некоторые нехарактерные моменты для обычных конвективных гроз. Генерация гамма-квантов, и рост интенсивности мюонов начались одновременно, сразу после молниевых разряда облако – земля. Впечатление такое, что отрицательный заряд в облаке мешал ускорению электронов, генерирующих гамма-кванты, пока не ушёл в землю.

Рис. 3. Грозное событие 22.06.2015 проходившее на фоне магнитосферной суббури с внезапным началом во время землетрясения (36.79°N 27.84°E 22.06.2015, 18:33:54 UT, 2 км, M2.1) и Форбуш–понижения с началом в 19:30 UT. Везде, где не оговорено специально, усреднение 10 с.

1) Приземное электрическое поле. 2) Давление. 3) Вариации интенсивности вторичных частиц космических лучей. Сверху вниз: вариации «перефериальных» (наклонных) мюонов (смещение +3%, $E > 100$ МэВ), вариации «вертикальных» мюонов ($E > 100$ МэВ), вариации электронно-фотонной компоненты (смещение -6%, $10 \text{ МэВ} < E < 30 \text{ МэВ}$). 4) Яркость свечения (RGB представление цвета, измерение в каналах) центральной области «тропосфера» в с. Хасанья. Сверху вниз: синий (B), красный (R), зелёный (G). Точками обозначены моменты измерения (серии 4 посекундных измерений со скважностью 1 мин.). 5) Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля (скважность 1 минута), индекс SYM-H (ресурс http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php) (направление на север). 6) Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля (скважность 1 минута), индекс SYM-D (ресурс http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php) (направление на восток).

Рис. 4. Грозовое событие 22.06.2015 проходившее на фоне магнитосферной суббури с внезапным началом во время землетрясения (36.79°N 27.84°E 22.06.2015, 18:33:54 UT, 2 км, M2.1) и Форбуш–понижения с началом в 19:30 UT. Везде, где не оговорено специально, усреднение 10 с.

1) Моменты землетрясений по миру (<https://www.emsc-csem.org/Earthquake>). 2) Вариации наклона земной поверхности (NS – направление Север-Юг). Ступенчатый характер данных объясняется разной чувствительностью в зависимости от измеряемого диапазона. Позже момента 22:25, 1В соответствует 5 с дуги. 3) Приземное электрическое поле. 4) Вариации интенсивности вторичных частиц космических лучей. Сверху вниз: вариации «периферийных» (наклонных) мюонов (смещение +3%, $E > 100$ МэВ), вариации «вертикальных» мюонов ($E > 100$ МэВ), вариации электронно-фотонной компоненты (смещение -6%, $10 \text{ МэВ} < E < 30 \text{ МэВ}$) 5) Яркость свечения (RGB представление цвета, измерение в каналах) центральной области «тропосфера» в с. Хасанья. Сверху вниз: синий (B), красный (R), зелёный (G). Точками обозначены моменты измерения (серии 4 посекундных измерений со скважностью 1 мин.). 6) Давление. 7) Возмущения симметричной составляющей геомагнитного поля (скважность 1 минута), индекс SYM-H (ресурс http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php) (направление на север).

В случае развития полей в атмосфере конвективным образом, более вероятным был бы меж-облачный разряд. Степень влияния атмосферного электрического поля на космические лучи не соответствует молниевой активности. Возможно, поле в атмосфере имело сейсмическое происхождение. Одновременно, вместе с моментом пересоединения межпланетного магнитного поля с геомагнитным, на поверхности Земли появились заряды, сформировавшие электрическое поле в атмосфере. Эти эффекты складываются. В связи с этим, можно внести в сложившуюся дискуссию по проблеме происхождения всплеска космических лучей, зарегистрированных 22.06.2015 рядом установок [10], новый элемент геофизического характера. Этот факт, возможно ответит на вопрос, поставленный в [2] о границах возможностей традиционных моделей предсказывать возмущение порога геомагнитного обрезания. Причина разногласий лежит в условиях измерений последствий возмущения геомагнитного поля.

Заключение

На фоне магнитосферной суббури с внезапным началом во время грозы, зарегистрирован факт постепенного проникновения большого отрицательного заряда с ионосферных высот на землю. Процесс сопровождался генерацией гамма-квантов с энергией 10 – 30 МэВ, и слабым свечением в оптическом диапазоне. Время спуска 9.5 минут. Амплитуда свечения в единицах интенсивности фотонов следующая: $R = 12 \cdot (2^{\pm 1})$ Рл, $G = 57 \cdot (2^{\pm 1})$ Рл, $B = 121 \cdot (2^{\pm 1})$ Рл. В фотометрических единицах. $R = 5.5 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-7}$ [кд · м⁻²], $G = 0.92 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-5}$ [кд · м⁻²], $B = 3.52 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-7}$ [кд · м⁻²]. Суммарно $1.01 \cdot (2^{\pm 1}) \cdot 10^{-5}$ [кд · м⁻²]. Визуально это не заметно.

В рассмотренном событии проявления грозовой активности в горном регионе на фоне магнитосферных возмущений можно отметить реализацию передачи заряда между землёй и ионосферой посредством аномально большого положительного тока от земли вверх.

Конкурирующие интересы. Авторы заявляют, что конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Все авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Список литература/References

- [1] P.K. Mohanty et al., “Transient Weakening of Earth’s Magnetic Shield Probed by a Cosmic Ray Burst”, *Physical review letters*, **117** (2016), 171101.
- [2] Evenson P., “Impulsive Increase of Galactic Cosmic Ray Flux Observed by IceTop”, *35th International Cosmic Ray Conference, Busan, PoS(ICRC2017)* (2017), 133.
- [3] Tsyganenko N.A., “Global quantitative models of the geomagnetic field in the cislunar magnetosphere for different disturbance levels”, *Planet. Space Sci*, **35** (1987), 1347–1358.
- [4] Собисевич А.Л и др., “О развитии работ по созданию Северо-Кавказской геофизической обсерватории”, *Природные процессы, геодинамика, сейсмотектоника и современный вулканизм Северного Кавказа*, КБГУ, Нальчик, 2008, 274–315. [Sobisevich A.L. et al., “O razvitiy rabot po sozdaniyu Severo-Kavkazskoy geofizicheskoy observatorii”, *Prirodnye protsessy, geodinamika, seysmotektonika i sovremennyy vulkanizm Severnogo Kavkaza*, KBSU, Nal’chik, 2008, 274–315].

- [5] Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., “Variations of cosmic ray muon flux during thunderstorms”, *Journal of Physics: Conference Series*, **409**:1 (2013), 4.
- [6] Khaerdinov M.N., Khaerdinov N. S., Lidvansky A. S., “Angular Dependence of Anomalous Disturbances of Muon Intensity during Thunderstorms”, *Intern. Symposium Thunderstorm Elementary Particle Acceleration (TEPA 2015)*, Nor Amberd, Armenia, 2015, 47–50.
- [7] Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С., Лидванский А.С., “Метод определения основных параметров грозового поля по вариациям мюонов, регистрируемых горизонтальной установкой”, *Известия РАН серия физическая*, **81**:2 (2017), 246–249. [Khaerdinov M.N., Khaerdinov N.S., Lidvansky A.S., “A method of determining basic thunderstorm field parameters from variations of cosmic ray muons detected by a horizontal array”, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, **81**:2 (2017), 226–229].
- [8] Denisenko V. V., Rycroft M. J., Harrison R. G., “Mathematical Simulation of the Ionospheric Electric Field as a Part of the Global Electric Circuit”, *Surveys in Geophysics*, **40** (2019), 1–35.
- [9] Канониди К.Х., Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С., “Грозовые эффекты по данным комплексного исследования вариаций вторичных частиц космических лучей”, *Известия РАН серия физическая*, **81**:2 (2017), 242–245. [Kanonidi K. Kh., Lidvansky A. S. Khaerdinov M. N., Khaerdinov N. S., “Thunderstorm effects according to data from a comprehensive study of variations in secondary cosmic ray particles”, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, **81** (2017), 222–225].
- [10] Mohanty P.K. et al., “Was the cosmic ray burst detected by the GRAPES-3 muon telescope on 22 June 2015 caused by a transient weakening of the geomagnetic field or by an interplanetary anisotropy?”, *Phys. Rev. D*, **97** (2018), 082001.

MSC 86A10

Research Article

Negative charge transfer from the ionosphere to the ground on the background of a magnetic storm

***N. S. Khaerdinov¹, D. D. Dzhappuev¹, K. Kh. Kanonidi², A. U. Kudjaev¹,
A. S. Lidvansky¹, V. B. Petkov¹, M. N. Khaerdinov¹***

¹ Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, prospekt 60-letiya Oktyabrya 7a, Moscow, 117312

² Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences Russian Federation, 108840, Moscow, Troitsk, Kaluzhskoe Hwy 4

E-mail: KhaerdinovNS@yandex.ru

During a magnetic storm on June 22, 2015, was accompanied by a Forbush decrease, some detectors of cosmic rays on the ground level recorded a positive disturbance of the particle intensity in the period 19:00 – 22:00 UT. This paper presents the data of detecting this burst in the North Caucasus region by the Carpet air shower array of the Baksan Neutrino Observatory. Experimental evidence in favor of a slow transfer in this period of a large negative charge from the ionosphere to the ground is presented.

Key words: cosmic rays, runaway electrons, magnetic substorms, atmospheric electricity, seismic activity, precursors of earthquakes.

DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-193-206

Original article submitted: 22.10.2020

Revision submitted: 05.02.2021

For citation. Khaerdinov N. S., Dzhappuev D. D., Kanonidi K. Kh., Kudjaev A. U., Lidvansky A. S., Petkov V. B., Khaerdinov M. N. Negative charge transfer from the ionosphere to the ground on the background of a magnetic storm. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2021, **34**: 1, 193-206. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-34-1-193-206

Competing interests. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

© Khaerdinov N. S. et al., 2021

Funding. The study was carried out without financial support from foundations.