Планетарные атмосферы как детекторы грозовых нейтронов

Л. П. Бабич[1)]

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, 607188 Саров, Россия

Поступила в редакцию 11 марта 2019 г.
После переработки 11 марта 2019 г.
Принята к публикации 4 апреля 2019 г.

Обсуждается возможность наблюдения грозовых нейтронов по их сигнатурам в виде довольно узких полос гамма-квантов в ближней мегаэлектронвольтной области энергий в результате радиационного захвата нейтронов ядрами азота непосредственно в атмосфере $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$. Отмечаются нерегулярности в этой области спектров грозового гамма-излучения, зарегистрированных в ближнем космосе и на морском побережье, которые могут интерпретироваться как сигнатуры грозовых нейтронов вследствие реакции $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$. Отмечается, что реакция $\mathrm{H}^1_1(n,\gamma)\mathrm{H}^1_2$ может быть причиной сигнатур грозовых нейтронов в водородно-метановых атмосферах гигантских планет солнечной системы.

DOI: 10.1134/S0370274X19100011

Введение. Начало исследований в области атмосферного электричества высоких энергий связано с публикацией в конце первой четверти прошлого столетия Чарльзом Вильсоном двух гипотез [1]. Широко известная в наше время гипотеза, предсказывающая ускорение электронов до высоких энергий в электрических полях грозовых облаков, подтверждена непосредственными наблюдениями грозовых импульсов электронов высоких энергий и их тормозного излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах – земных вспышек гамма-излучения (*Terrestrial Gamma-ray Flashes* – TGFs) миллисекундной длительности и продолжительных γ-свечений (см. обзор [2] и цитируемую литературу), описываемых в терминах лавины релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ) [3], способной развиваться в довольно слабых, но протяженных полях грозовых облаков или в сильных локализованных полях лидеров молнии. Менее известно предсказание Вильсона о возможности протекания ядерных реакций в грозах [1]. Поскольку среди дочерних продуктов ядерных реакций часто встречаются нейтроны, наблюдение усиления потока атмосферных нейтронов во времена гроз было бы прямым свидетельством ядерных реакций. Начиная с публикации Шаха и др. [4], в которой впервые сообщается о наблюдении грозовых нейтронов, в основном в новом тысячелетии, были опубликованы работы, в которых сообщается о статистически значимых событиях усиления потока атмосферных нейтронов в грозовых облаках и во времена гроз в различных областях Земли [5–20]. Усиления связываются с фотоядерными реакциями в атмосфере [3, 21, 22] и грунте поверхности Земли [15].

Газоразрядные счетчики, используемые в большинстве наблюдений грозовых нейтронов, не позволяют непосредственно на месте отделять нейтроны от других проникающих излучений, а именно, электронов высоких энергий и γ-излучения, которые способны вызывать в датчиках те же ионизационные эффекты, что и продукты реакций с участием нейтронов [23–25]. Характерные только для нейтронов реакции, дающие γ-сигнатуры нейтронов, позволяют преодолеть эту трудность [16, 19, 20]. Другая проблема – селекция нейтронов, рождаемых в электронно-фотонной лавине в атмосфере, и нейтронов, рождаемых в твердом веществе поверхности Земли и в самих приборах. Численным моделированием показано, что в наблюдениях на Тянь-Шанской обсерватории грозовые нейтроны генерируются в фотоядерных реакциях, главным образом, в твердой среде на земной поверхности [14]. Бауэрс (Bowers) и др. также подчеркивают "...важность учета термализации нейтронов в земле при анализе отклика приборов и эффективной радиационной дозы нейтронных вспышек" [20]. Однако наземные инструменты не способны непосредственно селектировать нейтроны, рожденные в воздухе и в твердой материи.

Иното (Enoto) и др. первыми зарегистрировали γ-сигнатуру грозовых нейтронов, произведенных TGF-подобной γ-вспышкой продолжительностью менее 1 мс, как пару фотонов с энергией $\varepsilon_\gamma = 511$ кэВ вследствие $\mathrm{e}^+\mathrm{e}^-$ аннигиляции дочерних позитро-

[1)]e-mail: babich@elph.vniief.ru; leonid.babich52@gmail.com

нов фотоядерных реакций с электронами окружающей среды [19]. Наблюдения выполнялись посредством сцинтилляционных детекторов $Bi_4Ge_3O_{12}$ и NaI(Tl) на берегу Японского моря. Авторам также удалось разделить нейтроны, рожденные в воздухе и в твердом веществе, используя то обстоятельство, что периоды полураспада $\tau_{1/2}$ гамма-нестабильных продуктов ^{27}Si и ^{26}Al фотоядерных реакций $^{28}Si(\gamma,n)^{27}Si$ и $^{27}Al(\gamma,n)^{26}Al$ в твердом веществе на порядок величины меньше, нежели $\tau_{1/2}$ продуктов ^{13}N и ^{15}O атмосферных реакций $^{14}N(\gamma,n)^{13}N$ и $^{16}O(\gamma,n)^{15}O$. Это оказалось возможным благодаря тому, что во время события, зарегистрированного Иното и др., ветер переносил грозовое облако, заполненное изотопами ^{13}N, ^{15}O и позитронами в направлении детекторов, причем произведение скорости ветра v_{wind} на положение максимума t_{peak} зарегистрированного аннигиляционного e^+e^- сигнала, оказалось близким к расстоянию между детекторами и местом удара молнии по поверхности моря [19].

Бауэрс и др. регистрировали грозовые излучения высоких энергий посредством пластмассового сцинтиллятора (пенопласт C_8H_8) также в прибрежной области Японского моря [20]. Во время грозы 3 декабря 2015 г. зарегистрирован резкий скачок скорости счета продолжительностью 9 мс в корреляции с близким разрядом молнии и большой вариацией атмосферного электрического поля. Наблюдавшуюся группировку скорости счета вблизи 2 МэВ авторы рассматривают как сигнатуру первичных грозовых нейтронов, замедлившихся в пластмассе, что доказывается моделированием методом Монте-Карло в предположении TGF спектра $f(\varepsilon) \sim \varepsilon_\gamma^{-1} \exp(-\varepsilon_\gamma/6.5\,\text{МэВ})$ [3, 20]. Авторы полагают, что группировка есть следствие эмиссии фотонов с энергией 2.223 МэВ в результате радиационного захвата нейтронов $H_1^1(n,\gamma)H_2^1$ ядрами водорода в пластмассе. Замечательно, что γ-спектр радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами водорода концентрируется в довольно узкой полосе энергий $\Delta\varepsilon_\gamma = 2{-}3$ МэВ с максимальной энергией $\varepsilon_{\gamma,\max} = 2.223$ МэВ [26].

Полосы гамма-квантов вследствие реакций радиационного захвата $N_{14}^7(n,\gamma)N_{15}^7$ в атмосфере как сигнатуры грозовых нейтронов. Бабич и Тарасов, исходя из определения рентгена, как энергии проникающей радиации, поглощенной единичным объемом воздуха, предложили использовать окружающий воздух в качестве дозиметра для измерения доз широкоапертурных пучков излучений, генерируемых мощными электрофизическими установками [27]. Следуя такому подходу, заманчиво выполнить анализ возможности использования самой атмосферы в качестве детектора грозовых фотоядерных нейтронов. Действительно, как и в пластмассовых детекторах [20], нейтроны, произведенные в грозовой атмосфере γ-фотонами высоких энергий, замедляются до тепловых энергий с последующим поглощением в реакциях радиационного захвата (n,γ) или в (n,p) реакциях с ядрами атмосферных компонентов. Было бы интересно, если бы продукты радиационного захвата нейтронов ядрами основных компонентов атмосферы могли бы наблюдаться как сигнатуры нейтронов.

Особенность, подобная той, что наблюдалась в работе [20] в гамма-спектре девозбуждения дейтерия H_2^1, образующегося в результате радиационного захвата $H_1^1(n,\gamma)H_2^1$ в пластмассовом детекторе, отсутствует в спектрах девозбуждения продуктов реакций $O_{16}^8(n,\gamma)O_{17}^8$ и $Ar_{40}^{18}(n,\gamma)Ar_{41}^{18}$. Но спектр гамма-девозбуждения ядра N_{15}^7, продукта радиационного захвата тепловых нейтронов атмосферным азотом $N_{14}^7(n,\gamma)N_{15}^7$ обладает этой особенностью, т.е. тоже концентрируется в пределах довольно узкой энергетической полосы, а именно, $\Delta\varepsilon_\gamma = 3{-}5$ МэВ с $\varepsilon_{\gamma,\max} = 4.95$ МэВ [26]. Наблюдение этой полосы могло бы быть прямым свидетельством генерации фотоядерных нейтронов непосредственно в грозовой атмосфере. Было бы крайне интересно проверить, наблюдалась ли полоса $\Delta\varepsilon_\gamma = 3{-}5$ МэВ в уже измеренных грозовых γ-спектрах. К сожалению, опубликовано только несколько статей о грозовом γ-излучении, в которых представлены наблюдавшиеся γ-спектры ([3] и цитируемая литература, [19, 28–33]), из которых спектры [19, 30, 32, 33] простираются в мегаэлектронвольтный диапазон.

Самые ранние наблюдения множественных TGFs с жесткими спектрами были выполнены с борта спутника NASA "Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI)", запущенного 5 февраля 2002 г. [30]. На рисунке 1 иллюстрируется объединенный спектр 86 TGFs, зарегистрированных за первые 6 месяцев миссии RHESSI. Авторы обращают внимание на "...выпуклость (*bump*) в области выше нескольких МэВ" [34] и полагают, что она может быть следствием фокусировки (по мнению Рюсселя–Дюпре (Roussel–Dupre)), или регистрации непосредственно электронов, что, по их мнению, маловероятно [34]. Что касается фокусировки, то, согласно результатам численного моделирования, данным RHESSI соответствует широкий пучок излучения в источнике на высоте 15 км [35]. Часть убегающих электронов высоких энергий, составляющих ЛРУЭ, действительно, может проникать в космос и давать вклад, наряду с тормозным γ-излучением

ЛРУЭ, в показания детекторов на борту спутников [36–38]. Такие объединенные TGF-подобные вспышки, включающие γ-кванты, электроны и позитроны наблюдались Бриггсом (Briggs) и др. с борта спутника "Fermi", запущенного 11 июля 2008 г. [31]. Усиления электронно-позитронного компонента космических лучей наблюдались во времена гроз на Баксанской нейтринной обсерватории [39, 40]. Возможно, однако, выпуклость в спектре RHESSI есть сигнатура γ-полосы радиационного захвата $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$, поскольку отсутствует в вычисленном отклике детектора на спектр тормозного излучения электронов с энергией 35 МэВ [30, 34] (см. рис. 1).

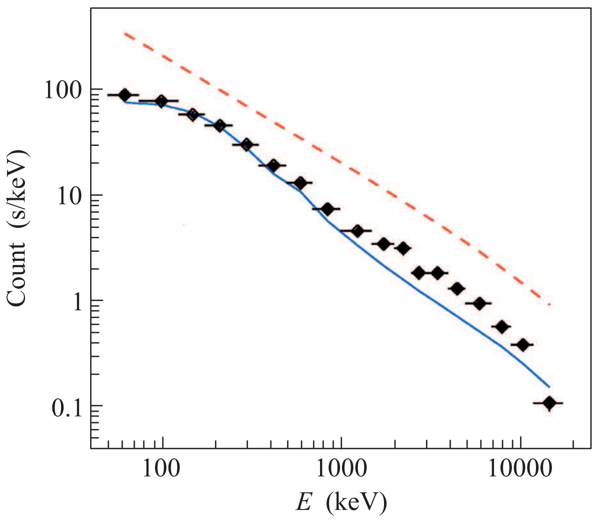

Рис. 1. (Цветной онлайн) Совокупный энергетический спектр TGFs, зарегистрированный с борта RHESSI (ромбы) с выпуклостью выше 2 МэВ и ожидаемый инструментальный отклик (сплошная линия) на тормозное излучение электронов с энергией 35 МэВ (пунктирная линия) [30, 34]

Во время выполнения эксперимента "Наблюдение зимних грозовых облаков в гамма-лучах (*Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds* – GROWTH)" в прибрежной области Японского моря, посредством сцинтилляционных детекторов NaI и CsI в ассоциации с зимними грозами получена запись семи γ-свечений продолжительностью более одной минуты [32]. На рисунке 2 иллюстрируется спектр двух из этих событий, наблюдавшихся 13 декабря 2007 г. и 25 декабря 2008 г. [32]. Как в случае RHESSI, наблюдается выпуклость в диапазоне энергий выше приблизительно 2 МэВ; поскольку наблюдения проводились на берегу моря, то возможен вклад реакций $\mathrm{H}^1_1(n,\gamma)\mathrm{H}^1_2$ и $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$.

В период с июня 2008 г. до января 2010 г. посредством миникалориметра MCAL на борту спутника Итальянского космического агентства AGILE (Проворный) зарегистрированы импульсные TGF – подобные события длительностью несколько миллисекунд или менее в диапазоне энергий вплоть до 100 МэВ [33]. На рисунке 3 показан совокупный спектр 130 наиболее качественных из числа наблюдавшихся TGFs с исключенным фоном. Выделяется выпуклость спектра в области энергий 4–5 МэВ, которая может быть следствием реакции $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$. Для демонстрации того, что выпуклость не есть эффект накопления, но является свойством спектров индивидуальных TGFs, на рис. 3 иллюстрируется спектр с выпуклостью в той же области одного из самых интенсивных TGFs [33].

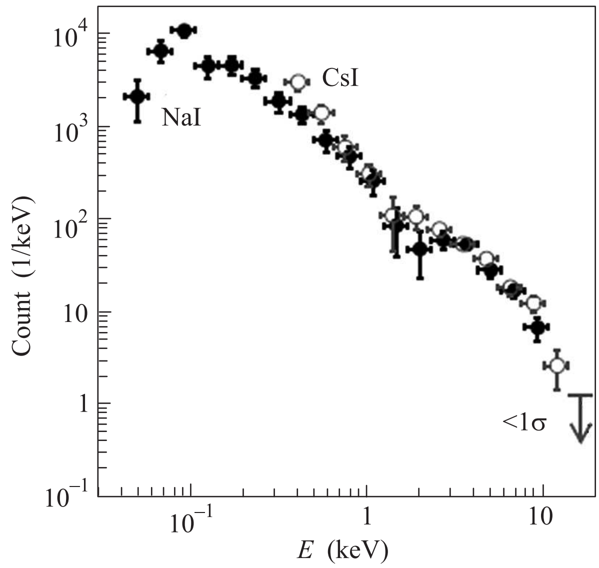

Рис. 2. Наземный спектр γ-излучения ($\pm 1\sigma$) в эксперименте GROWTH на берегу моря с выпуклостью выше 2 МэВ [32]

На рисунке 4 иллюстрируется спектр скорости счета γ-девозбуждения, зарегистрированный двумя детекторами после первичного микросекундного TGF в наблюдениях Иното и др. [19]. Результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что основной вклад в показания детектора A давало γ-излучение в результате захвата нейтронов в твердой материи, тогда как показания детектора C обусловлены γ-квантами, рожденными в атмосфере [19]. Выпуклость видна в показаниях детектора A вблизи 2 МэВ и на участке 4–5 МэВ рассчитанного спектра, возможно, вследствие реакций $\mathrm{H}^1_1(n,\gamma)\mathrm{H}^1_2$ в морской воде и $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$ в атмосфере соответственно. В показаниях детектора C и соответствующем рассчитанном спектре наблюдается выпуклость в окрестности 5 МэВ,

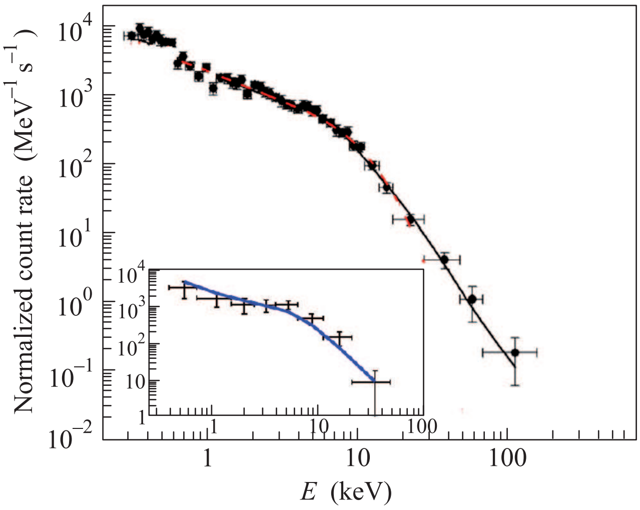

Рис. 3. (Цветной онлайн) Обобщенная спектральная скорость счета 130 TGFs, зарегистрированных микрокалориметром MCAL с борта AGILE с выпуклостью в районе 4–5 МэВ. На вкладке – спектральная скорость счета в индивидуальном событии TGF с выпуклостью в районе 4–5 МэВ. Сплошная линия – аппроксимация нормированного обобщенного спектра степенной функцией [33]

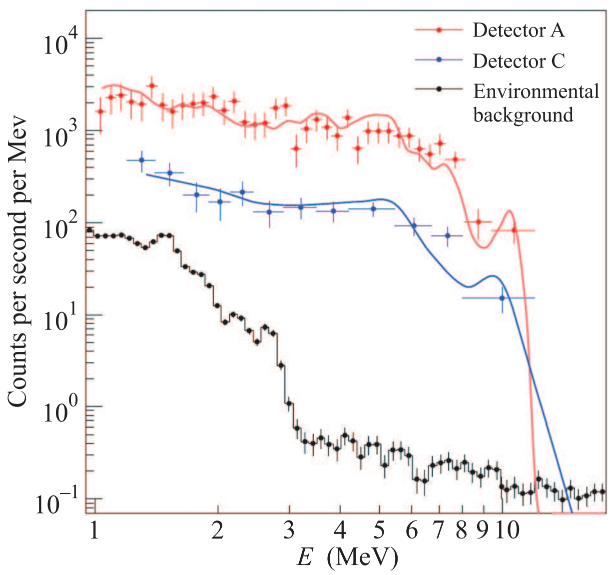

Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектры γ-девозбуждения: спектральное распределение скорости счета ($\pm 1\sigma$) и вычисленный спектр (кривые) [19]

возможно, обусловленная эмиссией в полосу с $\varepsilon_{\gamma,\max} = 4.95$ МэВ [26] в результате девозбуждения ядер N^7_{15}, рожденных в реакциях $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$ в атмосфере.

Заключение. Нерегулярности, обнаруживающиеся в нижней части мегаэлектронвольтного диапазона энергий грозовых γ-спектров, наблюдавшиеся в ближнем космосе [30, 33] и на морском побережье [19, 32], несовместимы с гладко падающим спектром тормозного излучения ЛРУЭ $f(\varepsilon) \sim \varepsilon_\gamma^{-1} \exp(-\varepsilon_\gamma/6.5\,\text{МэВ})$ [3, 20]. Возможно, они являются свидетельством реакций радиационного захвата нейтронов $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$ в атмосфере [19, 30, 33] и морской воде $\mathrm{H}^1_1(n,\gamma)\mathrm{H}^1_2$ [19, 32].

Довольно узкие полосы с $\varepsilon_{\gamma,\max} = 4.95$ МэВ [26] в γ-спектрах радиационного захвата тепловых нейтронов $\mathrm{N}^7_{14}(n,\gamma)\mathrm{N}^7_{15}$ ядрами азота, основного компонента атмосферы, могут являться сигнатурами грозовых нейтронов, рожденных в электронно-фотонной лавине в грозовой атмосфере. Наблюдение таких сигнатур позволило бы отделять фотоядерные нейтроны, рождаемые в атмосфере, от нейтронов, рождаемых в плотном веществе поверхности Земли и в самих приборах.

Бауэрс и др. зарегистрировали γ-полосу $\mathrm{H}^1_1(n,\gamma)\mathrm{H}^1_2$ малым детектором (цилиндр из пенопласта с одинаковыми высотой и диаметром 12.5 см). Хотя плотность пенопласта 1.05 г/см^3 на три порядка величины или более превышает плотность воздуха в тропосфере, это обстоятельство компенсируется огромными размерами области воздуха, работающей как нейтронный детектор, который ограничен размером первичной ЛРУЭ и пробегами вторичных γ-квантов тормозного излучения с энергиями выше фотоядерного порога 10.55 МэВ и пробегами фотоядерных нейтронов.

Наэлектризованные облака и разряды молнии наблюдаются в атмосферах других планет Солнечной системы, таких, как Юпитер, Сатурн или Венера; поэтому процессы генерации лавин электронов высоких энергий, тормозных γ-квантов и дочерних фотоядерных нейтронов, скорее всего, типичны не только для земной атмосферы, но и для других планетарных атмосфер [6, 41]. Поскольку атмосферы гигантов Солнечной системы, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, состоят в основном из свободного и связанного ($\mathrm{CH_4}$) водорода [26], наблюдение $\mathrm{H}^1_1(n,\gamma)\mathrm{H}^1_2$ γ-полосы могло бы свидетельствовать о протекании в этих атмосферах порождающих нейтроны ядерных реакций.

---

1. C. T. R. Wilson, Proc. Cambridge Phil. Soc. **22**, 534 (1924).
2. J. R. Dwyer, D. M. Smith, and S. A. Cummer, Space Sci. Rev. **173**, 133 (2012); doi: 101007/s11214-012-9894-0.
3. A. V. Gurevich, G. M. Milikh, and R. A. Roussel-Dupre, Phys. Lett. A **165**, 463 (1992); doi: 101016/0375-9601(92)90348-P.

4. G. N. Shah, H. Razdan, G. L. Bhat, and G. M. Ali, Nature **313**, 773 (1985).
5. A. N. Shyam and T. C. Kaushik, J. Geophys. Res. **104**, 6867 (1999).
6. Б. М. Кужевский, Вестник Московского университета, сер.3, Физика, Астрономия **5**, 14 (2004).
7. L. S. Bratolyubova-Tsulukidze, E. A. Grachev, O. R. Grigoryan, V. Kunitsyn, B. Kuzhevskij, D. Lysakov, O. Nechaev, and M. Usanova, Adv. Space Res. **34**, 1815 (2004).
8. A. A. Chilingarian, A. Daryan, K. Arakelyan, A. Hovhannisyan, B. Mailyan, L. Melkumyan, G. Hovsepyan, S. Chilingaryan, A. Reymers, and L. Vanyan, Phys. Rev. D **82**, 043009 (2010); doi: 101103/PhysRevD82043009.
9. A. Chilingarian, N. Bostanjyan, and L. Vanyan, Phys. Rev. D **85**, 085017 (2012); doi: 10.1103/PhysRevD.85.085017.
10. I. M. Martin and M. A. Alves, J. Geophys. Res. **115**, A00E11 (2010); doi: 101029/2009JA014498.
11. С. А. Стародубцев, В. И. Козлов, А. А. Торопов, А. Муллаяров, В. Г. Григорьев, А. В. Моисеев, Письма в ЖЭТФ **96**, 201 (2012) [S. A. Starodubtsev, V. I. Kozlov, A. A. Toropov, A. Mullayarov, V. G. Grigor'ev, and A. V. Moiseev, JETP Lett. **96**, 188 (2012)].
12. H. Tsuchiya, K. Hibino, K. Kawata et al. (Collaboration), Phys. Rev. D **85**, 092006 (2012); doi: 101103/PhysRevD85092006.
13. A. V. Gurevich, V. P. Antonova, A. P. Chubenko, A. N. Karashtin, G. G. Mitko, M. O. Ptitsyn, V. A. Ryabov, A. L. Shepetov, Yu. V. Shlyugaev, L. I. Vildanova, and K. P. Zybin, Phys. Rev. Lett. **108**, 125001 (2012); doi: 101103/PhysRevLett108.
14. A. V. Gurevich, A. M. Almenova, V. P. Antonova et al. (Collaboration), Phys. Rev. D **94**, 023003 (2016); http://dxDOIorg/101103/PhysRevD94023003.
15. A. V. Gurevich, V. P. Antonova, A. P. Chubenko, A. N. Karashtin, O. N. Kryakunova, V. Yu. Lutsenko, G. G. Mitko, V. V. Piskal, M. O. Ptitsyn, V. A. Ryabov, A. L. Shepetov, Yu. V. Shlyugaev, W. M. Thu, L. I. Vildanova, and K. P. Zybin, Atmospheric Research **164–165**, 339 (2015); http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.0040169-8095.
16. Y. S. Kuroda, S. Oguri, Y. Kato, R. Nakata, Y. Inoue, C. Ito, and M. Minowa, Phys. Lett. B **758**, 286 (2016).
17. P. M. Ishtiaq, S. Mufti, M. A. Darzi, T. A. Mir, and G. N. Shah, J. Geophys. Res., Atmosphere **121**, 692 (2016); doi: 101002/2015JD023343.
18. D. Umemoto, H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, M. Kawaharada, M. Kitaguchi, K. Nakazawa, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, T. Tamagawa, and K. Makishima, Phys. Rev. E **93**, 021201(R) (2016).
19. T. Enoto, Y. Wada, Y. Furuta, K. Nakazawa, T. Yuasa, K. Okuda, K. Makishima, M. Sato, Y. Sato, T. Nakano, D. Umemoto, and H. Tsuchiya, Nature **551**, 481 (2017); doi: 101038/nature24630.
20. G. S. Bowers, D. M. Smith, G. F. Martinez-McKinney, M. Kamogawa, S. A. Cummer, J. R. Dwyer, D. Wang, M. Stock, and Z. Kawasaki, Geophys. Res. Lett. **44**, 10.063 (2017); doi: 10.1002/2017GL075071.
21. Л. П. Бабич, Письма в ЖЭТФ **84**, 345 (2006) [L. P. Babich, JETP Lett. **84**, 285 (2006)]; doi: 101134/S0021364006180020.
22. L. P. Babich and R. A. Roussel-Dupre, J. Geophys. Res. **112**, D13303 (2007); doi: 10.1029/2006JD008340.
23. Л. П. Бабич, Е. И. Бочков, А. Н. Залялов, И. М. Куцык, Письма в ЖЭТФ **97**, 333 (2013); doi: 10.7868/S0370274X13060015 [JETP Lett. **97**, 291 (2013); doi: 101134/S0021364013060027].
24. L. P. Babich, E. I. Bochkov, J. R. Dwyer, I. M. Kutsyk, and A. N. Zalyalov, J. Geophys. Res., Space Physics **118**, 7905 (2013); doi: 101002/2013JA019261.
25. H. Tsuchiya, Astropart. Phys. **33**, 57 (2014); http://refhubelseviercom/S0169-8095(15)00179-9/rf0095.
26. *Таблицы физических величин*, И. К. Кикоин (ред.), Атомиздат, М. (1976).
27. Л. П. Бабич, М. Д. Тарасов, ПТЭ #3, 129 (2006) [L. P. Babich and M. D. Tarasov, Instr. and Exp. Techn. **49**, 417 (2006)]; doi: 10.1134/S0020441206030213.
28. M. McCarthy and G. K. Parks, J. Geophys. Res. **97**, 5857 (1992).
29. J. R. Dwyer, D. M. Smith, B. J. Hazelton, B. W. Grefenstette, N. A. Kelley, A. W. Lowell, M. M. Schaal, and H. K. Rassoul, J. Plasma Phys. **81**, 475810405 (2015); doi: 101017/S0022377815000549.
30. D. M. Smith, L. I. Lopez, R. P. Lin, and C. P. Barrington-Leigh, Science **307**, 1085 (2005).
31. M. S. Briggs, V. Connaughton, C. Wilson-Hodge, R. D. Preece, G. J. Fishman, R. M. Kippen, P. N. Bhat, W. S. Paciesas, V. L. Chaplin, C. A. Meegan, A. von Kienlin, J. Greiner, J. R. Dwyer, and D. M. Smith, Geophys. Res. Lett. **38**, L02808 (2011); doi: 10.1029/2010GL046259.
32. H. Tsuchiya, T. Enoto, S. Yamada, T. Yuasa, K. Nakazawa, T. Kitaguchi, M. Kawaharada, M. Kokubun, H. Kato, M. Okano, and K. Makishima, J. Geophys. Res. **116**, D09113 (2011); doi: 10.1029/2010JD015161.
33. M. Tavani, M. Marisaldi, C. Labanti et al. (AGILE Team), Phys. Rev. Lett. **106**, 018501 (2011); http://dxdoiorg/101103/PhysRevLett106018501.
34. D. M. Smith, L. I. Lopez, R. P. Lin, and C. P. Barrington-Leigh, EE350 Seminar Stanford University 1/12/2005 (2005).

35. B. J. Hazelton, B. W. Grefenstette, D. M. Smith, J. R. Dwyer, X.-M. Shao, S. A. Cummer, T. Chronis, E. H. Lay, and R. H. Holzworth, Geophys. Res. Lett. **36**, L01108 (2009); doi: 10.1029/2008GL035906.
36. N. G. Lehtinen, U. S. Inan, and T. F. Bell, Geophys. Res. Lett. **27**, 1095 (2000).
37. L. P. Babich, A. Yu. Kudryavtsev, M. L. Kudryavtseva, and I. M. Kutsyk, ZhETF **133**, 80 (2008) [JETP **106**, 65 (2008); doi: 10.1134/S1063776108010056].
38. J. R. Dwyer, B. W. Grefenstette, and D. M. Smith, Geophys. Res. Lett. **35**, L02815 (2008); doi:10.1029/2007GL032430.
39. N. S. Khaerdinov, A. S. Lidvansky, and V. B. Petkov, Atmospheric Res. **1–4**, 346 (2005).
40. N. S. Khaerdinov and A. S. Lidvansky, J. Phys.: Conf. Ser. **409**, 012230 (2013).
41. J. R. Dwyer, Phys. of Plasmas **14**, 042901 (2007); doi: 101063/12709652.