

# Планетарные атмосферы как детекторы грозовых нейтронов

Л. П. Бабич<sup>1)</sup>

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 мегаэлектронвольтовой области энергий в результате радиационного захвата нейтронов ядрами азота непосредственно в атмосфере  $N_{14}^7(n, \gamma)N_{15}^7$ . 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  $N_{14}^7(n, \gamma)N_{15}^7$ . Отмечается, что реакция  $H_1^1(n, \gamma)H_2^1$  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  $\gamma$ -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 об-

ластях Земли [5–20]. Усиления связываются с фото-ядерными 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  $\gamma$ -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  $\gamma$ -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 селективировать нейтроны, рожденные в воздухе и в твердой материи.

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

<sup>1)</sup>e-mail: babich@elph.vniief.ru; leonid.babich52@gmail.com

нов фотоядерных реакций с электронами окружающей среды [19]. Наблюдения выполнялись посредством сцинтилляционных детекторов  $\text{Vi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  и  $\text{NaI}(\text{Tl})$  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  $^{27}\text{Si}$  и  $^{26}\text{Al}$  фотоядерных реакций  $^{28}\text{Si}(\gamma, n)^{27}\text{Si}$  и  $^{27}\text{Al}(\gamma, n)^{26}\text{Al}$  в твердом веществе на порядок величины меньше, нежели  $\tau_{1/2}$  продуктов  $^{13}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$  атмосферных реакций  $^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$  и  $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$ . Это оказалось возможным благодаря тому, что во время события, зарегистрированного Иното и др., ветер переносил грозовое облако, заполненное изотопами  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  и позитронами в направлении детекторов, причем производство скорости ветра  $v_{\text{wind}}$  на положение максимума  $t_{\text{peak}}$  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  $\text{C}_8\text{H}_8$ ) 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  $\text{H}_1^1(n, \gamma)\text{H}_2^1$  ядрами водорода в пластмассе. Замечательно, что  $\gamma$ -спектр радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами водорода концентрируется в довольно узкой полосе энергий  $\Delta\varepsilon_{\gamma} = 2-3 \text{ МэВ}$  с максимальной энергией  $\varepsilon_{\gamma, \text{max}} = 2.223 \text{ МэВ}$  [26].

**Полосы гамма-квантов вследствие реакций радиационного захвата  $\text{N}_{14}^7(n, \gamma)\text{N}_{15}^7$  в атмосфере как сигнатуры грозовых нейтронов.** Бабич и Тарасов, исходя из определения рентгена, как энергии проникающей радиации, поглощенной единицей объема 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  $\gamma$ -фотонами высоких энергий, замедляются до тепловых энергий с последующим поглощением в реакциях радиационного захвата ( $n, \gamma$ ) 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  $\text{H}_2^1$ , образующегося в результате радиационного захвата  $\text{H}_1^1(n, \gamma)\text{H}_2^1$  в пластмассовом детекторе, отсутствует в спектрах девозбуждения продуктов реакций  $\text{O}_{16}^8(n, \gamma)\text{O}_{17}^8$  и  $\text{Ar}_{40}^{18}(n, \gamma)\text{Ar}_{41}^{18}$ . Но спектр гамма-девозбуждения ядра  $\text{N}_{15}^7$ , продукта радиационного захвата тепловых нейтронов атмосферным азотом  $\text{N}_{14}^7(n, \gamma)\text{N}_{15}^7$  обладает этой особенностью, т.е. тоже концентрируется в пределах довольно узкой энергетической полосы, а именно,  $\Delta\varepsilon_{\gamma} = 3-5 \text{ МэВ}$  с  $\varepsilon_{\gamma, \text{max}} = 4.95 \text{ МэВ}$  [26]. Наблюдение этой полосы могло бы быть прямым свидетельством генерации фотоядерных нейтронов непосредственно в грозовой атмосфере. Было бы крайне интересно проверить, наблюдалась ли полоса  $\Delta\varepsilon_{\gamma} = 3-5 \text{ МэВ}$  в уже измеренных грозовых  $\gamma$ -спектрах. К сожалению, опубликовано только несколько статей о грозовом  $\gamma$ -излучении, в которых представлены наблюдавшиеся  $\gamma$ -спектры ([3] и цитируемая литература, [19, 28-33]), из которых спектры [19, 30, 32, 33] простираются в мегаэлектронвольтовый 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  $\gamma$ -излучением

ЛРУЭ, в показания детекторов на борту спутников [36–38]. Такие объединенные TGF-подобные вспышки, включающие  $\gamma$ -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  $\gamma$ -полосы радиационного захвата  $N_{14}^7(n, \gamma)N_{15}^7$ , поскольку отсутствует в вычисленном отклике детектора на спектр тормозного излучения электронов с энергией 35 МэВ [30, 34] (см. рис. 1).

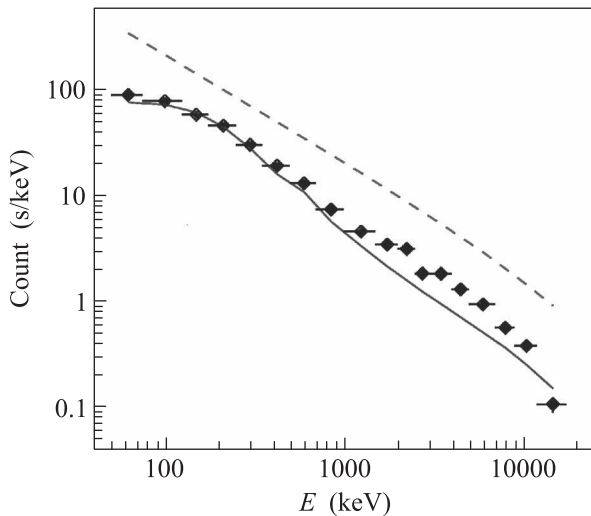


Рис. 1. (Цветной онлайн) Совокупный энергетический спектр TGFs, зарегистрированный с борта RHESSI (ромбы) с выпуклостью выше 2 МэВ и ожидаемый инструментальный отклик (сплошная линия) на тормозное излучение электронов с энергией 35 МэВ (пунктирная линия) [30, 34]

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  $\gamma$ -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  $H_1^1(n, \gamma)H_2^1$  и  $N_{14}^7(n, \gamma)N_{15}^7$ .

В период с июня 2008 г. до января 2010 г. посредством миникалориметра MCAL на борту спут-

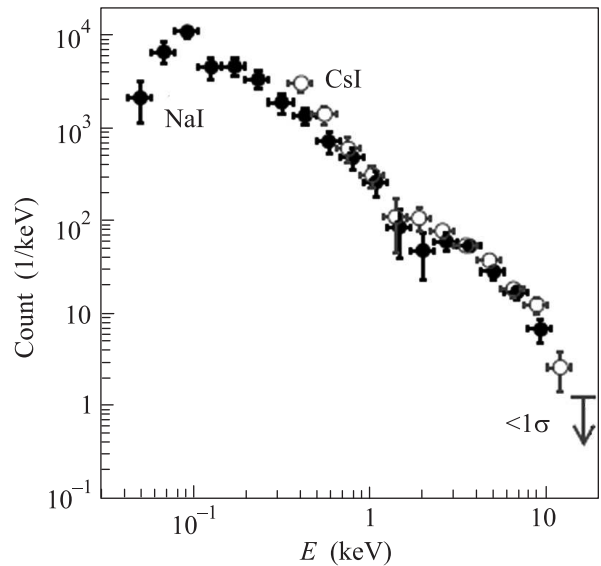


Рис. 2. Наземный спектр  $\gamma$ -излучения ( $\pm 1\sigma$ ) в эксперименте GROWTH на берегу моря с выпуклостью выше 2 МэВ [32]

ника 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  $N_{14}^7(n, \gamma)N_{15}^7$ . 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].

На рисунке 4 иллюстрируется спектр скорости счета  $\gamma$ -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 А давало  $\gamma$ -излучение в результате захвата нейтронов в твердой материи, тогда как показания детектора С обусловлены  $\gamma$ -квантами, рожденными в атмосфере [19]. Выпуклость видна в показаниях детектора А вблизи 2 МэВ и на участке 4–5 МэВ рассчитанного спектра, возможно, вследствие реакций  $H_1^1(n, \gamma)H_2^1$  в морской воде и  $N_{14}^7(n, \gamma)N_{15}^7$  в атмосфере соответственно. В показаниях детектора С и соответствующем рассчитанном спектре наблюдается выпуклость в окрестности 5 МэВ,

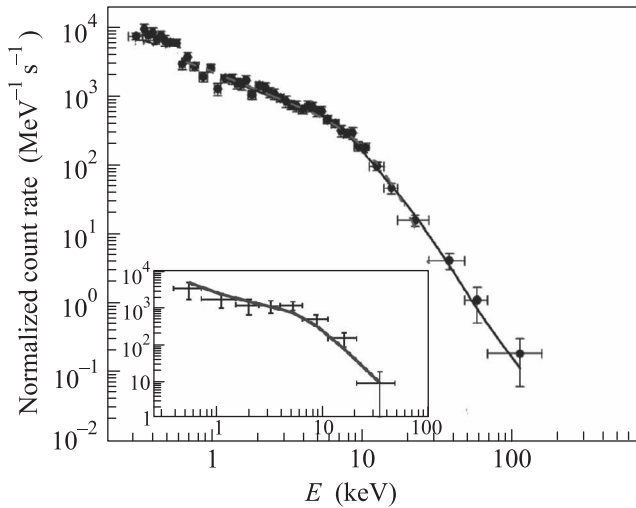


Рис. 3. (Цветной онлайн) Обобщенная спектральная скорость счета 130 TGFs, зарегистрированных микрокалориметром MCAL с борта AGILE с выпуклостью в районе 4–5 МэВ. На вкладке – спектральная скорость счета в индивидуальном событии TGF с выпуклостью в районе 4–5 МэВ. Сплошная линия – аппроксимация нормированного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

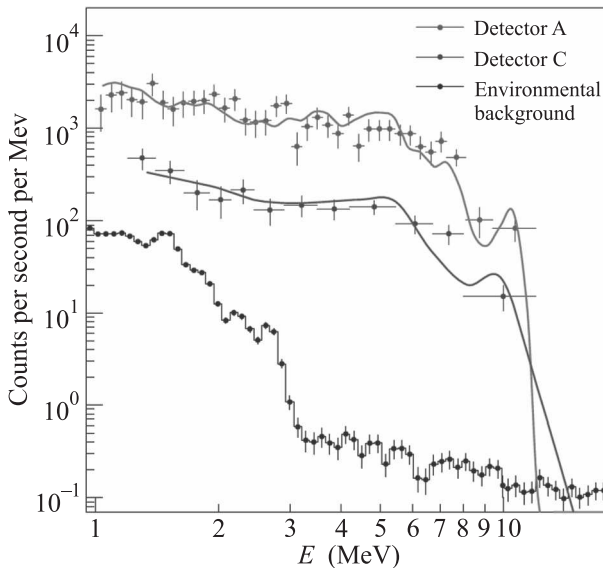


Рис. 4. (Цветной онлайн) Спектры  $\gamma$ -девозбуждения: спектральное распределение скорости счета ( $\pm 1\sigma$ ) и вычисленный спектр (кривые) [19]

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

**Заключение.** Нерегулярности, обнаруживающиеся в нижней части мегаэлектронвольтового

диапазона энергий грозовых  $\gamma$ -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  $N_{14}^7(n, \gamma)N_{15}^7$  в атмосфере [19, 30, 33] и морской воде  $H_1^1(n, \gamma)H_2^2$  [19, 32].

Довольно узкие полосы с  $\varepsilon_{\gamma, \max} = 4.95$  МэВ [26] в  $\gamma$ -спектрах радиационного захвата тепловых нейтронов  $N_{14}^7(n, \gamma)N_{15}^7$  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  $\gamma$ -полосу  $H_1^1(n, \gamma)H_2^2$  малым детектором (цилиндр из пенопласта с одинаковыми высотой и диаметром 12.5 см). Хотя плотность пенопласта  $1.05 \text{ г/см}^3$  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  $\gamma$ -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  $\gamma$ -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 ( $\text{CH}_4$ ) водорода [26], наблюдение  $H_1^1(n, \gamma)H_2^2$   $\gamma$ -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: 10.1007/s11214-012-9894-0.
3. A. V. Gurevich, G. M. Milikh, and R. A. Roussel-Dupre, Phys. Lett. A **165**, 463 (1992); doi: 10.1016/0375-9601(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. Кузевский, 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. Hovhannisyanyan, B. Mailyan, L. Melkumyan, G. Hovsepian, S. Chilingaryan, A. Reymers, and L. Vanyan, *Phys. Rev. D* **82**, 043009 (2010); doi: 10.1103/PhysRevD.82.043009.
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: 10.1029/2009JA014498.
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: 10.1103/PhysRevD.85.092006.
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: 10.1103/PhysRevLett.108.125001.
14. A. V. Gurevich, A. M. Almenova, V. P. Antonova et al. (Collaboration), *Phys. Rev. D* **94**, 023003 (2016); <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.94.023003>.
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.2015.06.004> 169–8095.
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: 10.1002/2015JD023343.
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: 10.1038/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: 10.1134/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: 10.1134/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: 10.1002/2013JA019261.
25. H. Tsuchiya, *Astropart. Phys.* **33**, 57 (2014); [http://refhubelseviercom/S0169-8095\(15\)00179-9/rf0095](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: 10.1017/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://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.018501>.
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.