

Что там над облаками: мир высотных электрических разрядов

Сурков В. В. Институт физики Земли РАН, ИЗМИРАН

# Содержание

#### 1. Введение

## 2. Спрайты

2.1. Основные свойства и морфология спрайтов

2.2. Механизмы образования спрайтов

2.3. Динамика развития спрайтов

2.4. Внутренняя структура и цвет спрайтов

2.5. Низкочастотные электромагнитные поля, генерируемые спрайтами

2.6. Воздействие спрайтов на ионосферу

#### 3. Голубые и гигантские джеты

3.1. Основные свойства и морфология голубых и гигантских джетов

3.2. Развитие гигантских джетов

3.3. Физические модели гигантских джетов

4. Эльфы

#### 5. Атмосферные вспышки гамма излучения

- 5.1. Экспериментальные данные
- 5.2. Пробой на убегающих электронах
- 5.3. Модели атмосферных вспышек гамма излучения

#### 1. Введение



Каждую секунду на Земле происходит около 50-100 обычных грозовых разрядов, 89% - внутри-облачные, 10% - разряды облако-земля, переносящие на землю отрицательный заряд и 1% - разряды облако-земля, переносящие на землю положительный заряд;.

#### Спрайты



Образуются на высотах 50 – 90 км, поперечный размер от 20 – 30 до 50 – 100 км, длительность свечения 1 – 100 мс, глобальная частота появления 0,5 - 1 раз в минуту

#### Спрайты

# ©2016 Scott McPartland SevereWeatherVideo.com

Высота 50 – 90 км, поперечный размер от 20 – 30 до 50 – 100 км, длительность свечения 1 – 100 мс, глобальная частота появления 0,5 - 1 раз в минуту.

#### Гало спрайта



Гало спрайта – область диффузного свечения на высоте 70-85 км, которая иногда предшествует возникновению спрайта

#### Голубой джет

Blue Jet (Transient Luminous Event) - Thunderstorm Darwin 8th Dec 2015 William Nguyen Phuoc

**Голубой джет** распространяются от вершины облака до высоты 40 – 50 км со скоростью около 100 км/с. Глобальная частота появления 0,01 случай в минуту.

#### Гигантский голубой джет



**Гигантские голубые джеты** распространяются от вершины облака до высоты 85 – 90 км, перенося в ионосферу гигантские электрические заряды до 120 Кл.

#### Эльфы



«Эльф» – это концентрический круг оптической эмиссии, возникающей сразу после разряда молнии на землю (любой полярности). Эльфы появляются на высоте 90 км в виде расширяющего круга, размер которого доходит до 300 - 700 км, а толщина 10 – 20 км, эльфы видны в течение интервала менее 0.1 мс.



• The ISUAL satellite measurements have shown that the global occurrence rate of elves, sprites, halos, and GJs can be estimated as 3.23, 0.50, 0.39, and 0.01 events per minute, respectively.



#### Наблюдение спрайтов с борта КА



# 2. Спрайты

#### 2.1. Основные свойства и морфология спрайтов



В 95 - 99% случаев спрайты возникают после положительных молний, зарядовый момент которых превышает 500 Кл·км [*Boccippio et al.*, 1995; *Williams et al.* 2007].

# Columns (Co) V-shaped (V) Carrots (Ca)



## 2.2. Механизмы образования спрайтов



Образование электронных лавин. Ударная ионизация и фотоионизация

Типичный стример – это самораспространяющийся (скорость 10<sup>2</sup>-10<sup>4</sup> км/с при атмосферном давлении) узкий канал, заполненный холодной слабо проводящей плазмой.

Плотность заряда в головке стримера столь велика, что электрическое поле вблизи головки может быть порядка  $(5-7)E_k$  [*Celestin and Pasko*, 2010].

Существует два вида стримеров, положительные и отрицательные, в зависимости от знака заряда в головке стримера. Отрицательный стример распространяется благодаря эжекции электронов из головки. Положительный стример движется вследствие инжекции электронных лавин из окружающей среды. [e.g., *Raizer et al.*, 1998; *Bazelyan and Raizer*, 1998].

 $E_{cr}^+ = 4.4 \text{ кB/см}$   $E_{cr}^- = -12.5 \text{ кB/см}$ 

#### Стримеры в лабораторных условиях



Taken from Ebert et al.

Реакции ударной ионизации молекул кислорода и азота в воздухе

$$e^{-} + O_{2} \rightarrow 2e^{-} + O_{2}^{+},$$
  
 $e^{-} + N_{2} \rightarrow 2e^{-} + N_{2}^{+}.$ 
(5)

Реакция диссоциативного присоединения электронов имеет энергетический барьер 3,6 эВ

$$O_2 + e^- \to O^- + O \tag{6}$$

Трёхчастичная реакция присоединения электронов

 $N_m \approx N_0 \exp$ 

$$O_2 + e^- + A \to O_2^- + A + 0.5 \,\mathrm{eV}$$
 (7)

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \mathbf{v}_d N_e \right) = \left( \nu_i - \nu_a \right) N_e + \nabla \cdot \left( D_e \nabla N_e \right) + S_{ph} \tag{9}$$

 $N_e$  и  $\mathbf{v}_d$  - концентрация и дрейфовая скорость электронов,  $V_i$  и  $V_a$  - частоты ионизации и присоединения электронов,  $D_e$  - коэффициент диффузии электронов,  $S_{ph}$  – скорость фотоионизации.

$$(-z/h) \Rightarrow \begin{bmatrix} E_k \approx 32 \exp(-z/h), \text{ KB/cM} \\ h = 8 - 10 \text{ KM} \end{bmatrix}$$

(



Вертикальное электрическое поле, возникающее в окрестности тучи перед появлением спрайта. Линиям 1 – 3 отвечают заряды тучи q = 50,100 и 150 Кл, соответственно. При расчётах проводимость воздуха не учитывалась. Критические электрические поля, отвечающие разным механизмам пробоя воздуха. Показаны пунктирными линиями: 4 – стандартный пробой, 5 – распространение отрицательного стримера, 6 – распространение положительного стримера, 7 – пробой на убегающих электронах. Штрих-пунктирная линия 8 иллюстрирует влияние проводимости воздуха (q = 150 Кл).

#### 2.3. Динамика развития спрайтов

#### Развитие спрайта из атмосферной неоднородности



t = 5.29 ms t = 5.71 ms t = 5.99 ms t = 6.41 ms t = 6.69 ms t = 6.96 ms t = 7.38 ms t = 10.29 ms

High speed sprite images from 13 August 2005 at 03:43:09.4 UT, each labeled with its time from the lightning return stroke onset. The initiation point of the left sprite (A) is marked with an arrow. The first image is contrast enhanced.

Cummer, S. A., N. Jaugey, J. Li, W. A. Lyons, T. E. Nelson, and E. A. Gerken (2006), Submillisecond imaging of sprite development and structure, Geophys. Res. Lett., 33, L04104, doi:10.1029/2005GL024969.

#### Развитие спрайта из гало



Figure 2. High-speed sprite images from 13 August 2005 at 03:12:32.0 UT, each labelled with its time from the lightning return stroke initiation [30]. Reprinted with permission from the American Geophysical Union.

Cummer, S. A., N. Jaugey, J. Li, W. A. Lyons, T. E. Nelson, and E. A. Gerken (2006), Submillisecond imaging of sprite development and structure, Geophys. Res. Lett., 33, L04104, doi:10.1029/2005GL024969.



04:36:09.230 UT 05:24:22.804 UT The images illustrating the altitude transition between diffuse and streamer regions in sprites observed on August 18, 1999 by Stenbaek-Nielsen et al. [2000]

### 2.4. Внутренняя структура и цвет спрайтов



Figure 5. Sprite spectrum computed for reduced electric field of 300 Td and altitude of 80 km (black vertical lines) and the absolute sensitivity of AP at channel 8 (grey lines).

Few eV: vibrational and rotational states are excited Higher energies: electronic states are excited=>light emissions (7.5 eV for  $N_2$ )

Even higher energies: ionization (15.57eV for  $N_2$ )

N<sub>2</sub> energy diagram.



#### Стримерная структура спрайтов



Telescopic imaging of sprites. Wide (left panel) and narrow (right panel) field of view images of a bright sprite event [Gerken et al., 2000].

#### Соотношения подобия для стримеров

 $_{L^{E_h}}$ Длина и радиус головки стримера  $L \propto N_m^{-1}$ время релаксации  $T \propto N_m^{-1}$ критическое электрическое поле  $E \propto N_m$ Заряд на поверхности стримера  $q \propto N_m^{-1}$ концентрация электронов  $N_e(z) \propto N_m^2$ электропроводность стримера  $\sigma_{s} \propto N_{m}$ (e.g., see *Raizer et al.* [1998])







 $E_{\cdot}$ 

# 2.5. Низкочастотные электромагнитные поля, генерируемые спрайтами



Azimuthal component of the ELF/VLF magnetic field variation recorded at Duke University, <u>North Carolina</u> on 3 October 2004 at 0426:55.6 UT. The peaks on the graphs are presumably due to the current pulses generated by the causative +CG lighting and sprite. Adapted from Cummer et al. (2006a).



North-south component of ELF magnetic field caused by spriteproducing lightning event recorded at Hokuriku area, Japan on February 03, 2007 (Matsudo et al. 2009; Surkov et al., 2010). The peak marked by vertical red line coincides in time with the appearance of sprite luminosity. Adapted from Surkov et al. (2010), with permission, Elsevier.

#### 2.6. Воздействие спрайтов на ионосферу



3. Голубые и гигантские джеты 3.1. Основные свойства и морфология голубых и гигантских джетов







Scale km



A gigantic jet over Pilbara, Australia, on March 28, 2017 captured by Jeff Miles. The ISUAL experiment observed global rates of 0.50, and 0.01 events per minute for sprites and gigantic jets, respectively (Chen et al., 2008)

#### 3.2. Развитие гигантских джетов



Illustration GJ evolution as observed by **a** Pasko et al. (2002) and **b** Soula et al. (2011). Triangles and circles indicate the heights the GJ top depending on time. The initial and final stages of GJ evolution is approximated with dashed straight lines. Taken from da Silva and Pasko (2013).



An example of the images sequences of the GJ development captured from the north coast of Colombia, Cartagena on November 19, 2018. The upper panel shows the selected images recorded by the high speed camera with a time resolution of 1 ms. A dotted line in the left upper corner indicates the brief downward extension of a streamer starting at the same time as the final upward jump. The lower panel demonstrates a zoom in time of the FDJ stage of the GJ with a temporal resolution of 0.2 ms. The uneven background was subtracted, horizontal banding noise removed, and contrast enhanced. Taken from van der Velde et al. (2019).

# 3.3. Физические механизмы и модели гигантских джетов



Examples of altitude dependence of balloon-measured vertical electric field in a thundercloud. The arrows L indicate the heights at which a CG lightning leader may start to develop. Adapted from Marshall et al. (1996)



Simplified models of electric charge distribution in a thundercloud. Blue and red contours indicate negative and positive charge areas. The numbers in the columns on the right indicate the charges of the corresponding areas in coulombs. Taken from Krehbiel et al. (2008).

Numerical simulation of the altitude dependence of the thunderstorm QE field, which may precede the occurrence of the CG discharge. Vertical component of the QE field versus altitude is shown with solid line. A runaway breakdown field and the electric fields required for propagation of positive and negative streamers in the air are shown with dashed lines 1, 2 and 3, respectively. Adapted from Surkov and Hayakawa (2012).



21

18

15

12

0

-3)

-120+25

> 18 (km)

12



**Figure 1.** (a) A photograph of a positive streamer in a 40 mm gap in air at 1 bar (adapted from *Briels et al.* [2008] with permission). (b) A photograph of a positive laboratory leader (adapted from *Raizer et al.* [2007] with permission from Elsevier).

A schematic jet model. Raizer et al., 2010 [8] Contrary to streamers, a positive leader (such as shown in Figure 1b) represents a hot conductive plasma channel, quasi-continuously emitting a fan of streamers, termed the streamer zone or corona. The tip moves at a speed much slower than that of individual streamers. Gas in the leader channel is heated up to a few thousand K by the current. A

# 4. Эльфы



Elves above a powerful thunderstorm in the Czech Republic captured by Martin Popek at night on April 2, 2017. This image was taken from spaceweathergallery.com

#### Причины возникновения эльфов



Наиболее сильные грозовые разряды с пиковым током более 60 кА порождают электромагнитный импульс, мощностью около 10 ГВт. Мощность такого импульса, достаточна, чтобы проникнуть в нижнюю ионосферу. В ионосфере энергия этого импульса поглощается свободными электронами, что приводит к их возбуждению. Возбуждённые электроны, сталкиваясь с окружающими молекулами газа (прежде всего азота), ионизируют их, заставляя светиться в красной области спектра.





#### Time-integrated





Figure 25 shows the event called a "tiger Elve", which illustrates the striations in the Elves luminosity observed using a high-speed camera system near Fort Collins, Colorado on June 12, 2013 (Yue and Lyons, 2015).

#### Атмосферные вспышки ультрафиолетового излучения, зарегистрированные спутником «Университетский- Татьяна»

Garipov, G.K., Khrenov, B.A., Klimov, P.A., Klimenko, V.V., Mareev, E.A., Martines, O., Mendoza, E., Morozenko, V.S., Panasyuk, M.I., Park, I.H., Ponce, E., Rivera, L., Salazar, H., Tulupov, V.I., Vedenkin, N.N., Yashin, I.V., 2013. Global transients in ultraviolet and redinfrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite. Journal of Geophysical Research. Atmoshere 118, 370 – 379, doi:10.1029/2012JD017501

Among the short events, there are the lowestphotonnumber events with  $Q_a < 10^{21}$  ("dim") to compare with luminous events of  $Q_a < 10^{23}$ . The difference between the dim events and luminous events is not quite determined; it is rather the difference in their rate that is.



Fig. 9a Global map of UV transients with  $Q_a < 5 \cdot 10^{21}$ .



Fig. 9b. Global map of transients with  $Q_a > 5 \cdot 10^{21}$ .

# 5. Атмосферные вспышки гамма излучения 5.1. Экспериментальные данные





Figure 3: Geographical distribution for March 2009 - July 2012 period of RHESSI TGFs (red crosses) and AGILE TGFs (black crosses). Vertical black lines limits latitudes used for regional analysis

Земные гамма-вспышки (TGFs) - это короткие вспышки направленного вверх рентгеновского и гаммаизлучения, обнаруженные на борту низкоорбитальных спутников над активными грозами. Это явление было впервые замечено в 1994 году в ходе эксперимента BATSE (Burst and Transient Source Experiment) на борту Compton Gamma-Ray Observatory.



**Рис. 1.** ВАТЅЕ имел 8 сцинтилляционных панелей (указаны стрелками) с эффективной площадью около 2000 см<sup>2</sup>, чувствительных к энергиям квантов от 25 кэВ до 1 МэВ. (NASA, GSFC, P.G.T. Leonard)



**Рис. 6.** The Atmosphere-Space Interactions Monitor (ASIM) is an instrument suite on the International Space Station (ISS) for measurements of lightning, Transient Luminous Events (TLEs) and Terrestrial Gamma-ray Flashes (TGFs). Neubert et al, 2019



#### TGFs: RHESSI, BATSE/CGRO

- 1 or more  $\sim 1$  ms pulses
- <10 keV to >20 MeV
- lightning-associated within 300 km within ~1 ms
- spectra fit by **RREA**/bremsstrahlung at 15-20 km altitudes



5-10 ms pulse without storm activity

**Рис. 5.** Пример TGF. Taken from Carlson et al. 2003

#### Лидер молнии - источник убегающих электронов

The TGF photons in the events analyzed here were observed by the Gamma-ray Burst Monitor (GBM) instrument on the Fermi satellite (Cummer et al., 2015)



**Puc. 10.** Summary of data for 1 July 2014 TGF. (top) Time-aligned LF radio signal and BGO gamma ray counts, referenced to the source location. The TGF occurred roughly in the middle of eight distinct radio pulses in a 5 ms time window. (bottom row) Zoom-in on the (bottom left) second and (bottom right) eighth radio pulses, showing that two ionospherically reflected pulses are clearly detectable for each ground wave. The relative timing of the reflected pulses reflects the source altitude of each.

#### 5.2. Пробой на убегающих электронах

Характерная энергия электронов, приводящих к ионизации молекул при тепловом пробое порядка 10–20 эВ в т о время как средняя энергия электронов около 2 эВ. Типичные энергии при пробое на убегающих электронах порядка 1 МэВ.



$$\Rightarrow F_{fr}(\varepsilon) \sim \frac{e^4 Z N_m}{\varepsilon}$$

Figure by V. Pasko, from tutorial at the NATO summer institute on Sprites, etc., Corte, Corsica, 2004



Динамическая сила трения в зависимости от энергии электронов.

 $\mathcal{E}_*$  - энергия теплового пробоя на убегающих электронах,  $eE_{th} \approx 260$  кВ/см, [*Gurevich and Zybin*, 2001].



The combined discharge arising from runaway breakdown triggered by a cosmic-ray extensive atmospheric shower (EAS) is shown schematically during a thunderstorm at the Tien-Shang Mountain Scientific Station in Kazakhstan with its Y-shaped gamma-ray detectors. Taken from Gurevich, A. V., and K. P. Zybin (2005), Runaway breakdown and the mysteries of lightning, *Physics Today*, May, 37 – 43

#### Роль затравочных электронов



Для инициирования пробоя на убегающих электронах энергия частиц, падающих из космоса, должна быть порядка или больше, чем 10<sup>15</sup> эВ [*Gurevich et al.*, 1999].

## 5.3. Модели атмосферных вспышек гамма излучения





(1) photon energy spectrum is mainly determined by the bremsstrahlung of relativistic electrons;

(2) TGF source emits  $10^{16}$ - $10^{18}$  photons in the energy range from tens of keV to ~20 MeV;

(3) photon mean free path in the atmosphere is proportional to the number density of air molecules and depends on photon energy; and

4) TGF source is located at the altitude of about 12-14 km or even higher.



# Благодарю за внимание!

Paul M Smith

#### Сурков Вадим Вадимович

Профессор, доктор физико-математических наук Ведущий научный сотрудник лаборатории физики околоземного пространства Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

surkovvadim@yandex.ru