Главная стадия молнии: наблюдения и проблемы

Е.А.Мареев и коллеги Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

evgeny.mareev@gmail.com

Особая благодарность: Н.А.Богатову, В.А.Ракову, Н.Н.Слюняеву

В работе участвуют: ННГУ, Департамент Росгидромета по ПФО, Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ, Гидрометцентр, ИВМ РАН, РГГМУ, НИРФИ, ВЭИ

План

- Э Основные термины и концепции
- Результаты наблюдений главной стадии в натурных и лабораторных условиях
- Статистика пиковых токов первой и последующих компонент отрицательной молниевой вспышки
- Моделирование возвратного удара с использованием уравнений газодинамики и уравнений длинной линии
- Некоторые нерешенные проблемы
- (3 литературных паузы)

Молния: физика и эффекты

ФИЗИКА МОЛНИИ

КЛИМАТОЛОГИЯ МОЛНИИ

МОЛНИЕЗАЩИТА

Разряды облако-земля и внутриоблачные разряды





pd < 200 Тор · см: лавинный механизм (Таунсенд)

$pd > 10^3$ Тор·см: стримерный механизм

Лавины, стримеры, стемы, лидеры...





- Avalanches
- Streamers
- Stems, Stalkers
- Leaders:
 - positive/negative
 - first/subsequent
 - direct/recoil
- Return stroke (spark)





Стенд «СПРАЙТ»



Натурные наблюдения



ideo camera on the right of July 24, 1996 during

Лабораторный эксперимент

Negative leader steps. Space stem





Стекольников И.С., Шкилев А.В., ДАН СССР, 1962

> Горин Б.Н., Шкилев А.В., Электричество, 1976

Rees et al., J. Phys. D, 1995







Streak photograph and sketch showing the development of a laboratory positive discharge (10 meter gap, $t_{\rm m} = 500 \ \mu s, V_{\rm max} = 2.5 \ {\rm MV}$).

Ступени отрицательного лидера



Длительность 40 мкс. Выдержка кадров – 1 мкс, между кадрами – 5 мкс. Задержка со времени срабатывания ГИН – 45 мкс. Со времени первой вспышки стримерной короны до первого кадра 20 мкс.

Положительный лидер





Природа ступеней лидера

Biagi et al., JGR, 2010

V. A. Rakov, The Physics of Lightning, Surveys in Geophysics, 2013

Petersen and Beasley, JGR, 2013



The bottom 20 m of the downward-extending leader channel of a triggered-lightning flash (Camp Blanding, Florida) in the nine high-speed video frames (240 kfps, 4.17 μ s per frame). Each image shows about 20 m \times 20 m. The *white arrows* point to the luminous segments (space stems or leaders), 1–4 m in length, that formed separately from and 1–10 m below the downward-extending leader channel. The leader traveled about 100 m from frame 1 to frame 9 where it was about 30 m above its termination point. The return stroke began during frame 10. Adapted from Biagi et al. (2010)



Illustration of the development of negative stepped leader in a long laboratory spark, based on a description given by Gorin et al. (1976). It schematically shows a snap-shot (*left*) and a time-resolved optical picture (*upper right*) including an initial impulsive corona from the negative high-voltage electrode and the first two steps, along with the corresponding current through the gap (*lower right*). Adapted from Biagi et al. (2010)



Отрицательный разряд облако-земля

Cloud Charge Preliminary Stepped Distribution Breakdown Leader 1.00 ms t = 01.10 ms 1.20 ms First Attachment Return Process Stroke 19.00 ms 20.00 ms 20.10 ms 20.20 ms Second K and J Dart Return Processes Leader Stroke 40.00 ms 60.00 ms 62.05 ms 61.00 ms

"Lightning: Physics and Effects" (V.A. Rakov and M.A. Uman, 2003, Cambridge University Press)

Параметры отрицательных вспышек

| First return stroke | |
|---|-----------------------|
| Peak current, kA | 30 |
| Maximum current rate of rise, kA µs-1 | ≥10–20 |
| Current risetime (10–90 percent), µs | 5 |
| Current duration to half-peak value, µs | 70–80 |
| Charge transfer, C | 5 |
| Propagation speed, m s-1 | $(1-2) \times 10^{8}$ |
| Channel radius, cm | ~ 1-2 |
| Channel temperature, K | ~ 30 000 |
| | |
| Overall flash | |
| Duration, ms | 200–300 |
| Number of strokes per flash | 3–5 |
| Interstroke interval, ms | 60 |
| Charge transfer, C | 20 |
| Energy, J | 10^9-10^10 |

Этапы развития главной стадии и формирование ее тока (БГЛ, 1978)



Диагностические инструменты





Скоростная оптическая камера 4 Picos Скоростная ИК-камера FLIR CS7700 M





Арбалет TenPoint TurboXLTII с подвижной станиной для крепления LeadSledDFT

Эксперименты с искусственным облаком





1 – парогенератор, 2 – высоковольтный источник питания, 3 – заряженное аэрозольное облако, 4 – СВЧ генератор, 5 – излучающий рупор, 6 – линзы, 7 - СВЧ пучок, 8 – детектор, 9 – осциллографы, 10 – измерительный шунт, 11 – искровой разряд облако-земля



Встреча нисходящего отрицательного лидера и восходящего положительного



Сквозная фаза



1 – отрицательный нисходящий из облака лидер, 2 – интенсивное взаимодействие стримерных зон, 3 – восходящий с токоприемника (шарика) __положительный лидер. Выдержка кадра I – 100 ns, II – 50 ns. Время между кадрами – 2 мкс.

Downward and upward leaders; lightning attachment



Two 4Picos frames showing the break-through phase (I) and later return-stroke stage (II) of a negative discharge to ground generated by the cloud of artificially-charged water droplets. The exposure time for each frame is 100 ns and the time interval between frames is 2 μ s. Labeled are the electrodeless downward negative leader 1, upward positive leader 2, and the common streamer zone 3. Image (II) was considerably fainter than image (I) and was contrast-enhanced more than image (I), to improve its visualization. AGP stands for "above the grounded plane"

Ток главной стадии



Miki et al. (2002)

Return stroke current at the channel base and (b) corresponding horizontal (radial) electric field 0.1 m from the triggered lightning channel core

Maslowsky and Rakov (2006)



Первая и последующие компоненты





Proctor, JGR, 1988

Rakov et al., JGR, 2001

Lapierre al., JGR, 2014



Многокомпонентная вспышка



Золотой век

В душном воздуха молчанье, Как предчувствие грозы, Жарче роз благоуханье, Резче голос стрекозы...

Чу! за белой, дымной тучей Глухо прокатился гром; Небо молнией летучей Опоясалось кругом...

Сквозь ресницы шелковые Проступили две слезы... Иль то капли дождевые Зачинающей грозы?..



Гремят раскаты молодые, Вот дождик брызнул, пыль летит, Повисли перлы дождевые, И солнце нити золотит.

Одни зарницы огневые,

Воспламеняясь чередой,

Как демоны глухонемые,

Ведут беседу меж собой.





Гроза надвигалась. Впереди огромная лиловая туча медленно поднималась из-за леса; надо мною и мне навстречу неслись длинные серые облака; ракиты тревожно шевелились и лепетали. Душный жар внезапно сменился влажным холодом; тени быстро густели.



«Все лучшие произведения мои писаны мною для какогонибудь сильного таланта и под влиянием этого таланта»





Кулигин. Вот хоть бы теперь то возьмем: у нас грозы частые, а не заведем мы громовых отводов.

Дикой. Да гроза-то что такое по-твоему, а? Ну, говори!

Кулигин. Электричество.

Дикой (топнув ногой). Какое еще там елестричество! Ну, как же ты не разбойник! Гроза-то нам в наказание посылается, чтобы мы чувствовали...

Кулигин. Ну чего вы боитесь, скажите на милость! Каждая теперь травка, каждый цветок радуется, а мы прячемся, боимся, точно напасти какой! Гроза убьет! Не гроза это, а благодать! Да, благодать! ... ну смотрел бы да любовался! А вы боитесь и взглянуть-то на небо, дрожь вас берет! Изо всего-то вы себе пугал наделали. Эх, народ! Я вот не боюсь. 28

Расчет электрических параметров

• частицы, переносящие

заряд

Льдинки (10-100 мкм)

Снежная крупа (0,4-4 мм)

• безындукционный механизм зарядки¹

• плотность зарядов на частицах снежной крупы пропорциональна их массе в единичном объеме воздуха

• в нижней части грозового облака на льдинках отрицательный заряд, а на снежной крупе – положительный; в верхней части облака знаки зарядов об

• заряд на снежной крупе:

$$\frac{\partial Q_g}{\partial t} = \nu \left(Q_0 + \beta E - \gamma Q_g \right)$$

²Clive Saunders. Charge separation mechanisms in clouds. Space Science Review. V. 137, p. 335-353. 2008.





¹Mansell, E. R., D. R. MacGorman, C. L. Ziegler, and J. M. Straka. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm, J. Geophys. Res., 110, D12101. 2005.

Процессы электризации

$$\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = \sum_{i} \boldsymbol{j}_{i} = 4\pi \left(\boldsymbol{J} - \boldsymbol{j}_{cd} - \boldsymbol{j}_{dif} \right)$$

J – ток зарядки, j_{cd} – ток проводимости, j_{dif} – ток диффузии $J_{0z} = \langle QNU_z \rangle = \langle Q_0NU_0 \rangle + \langle Q_1NU_1 \rangle = J' + J''$

Заряд, передаваемый за соударение: $\Delta Q = \eta \left[\delta q + \gamma_2 Q \frac{r^2}{R^2} - q \right]$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{u - v_T}{\tau_{st1}} + g, \qquad \left\langle U_1^2 \right\rangle = A \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int_{0}^{\infty} dk \frac{\omega^2 \exp\left(-3\omega^2 / 2k^2 \sigma_v^2\right)}{\left(1 + \omega^2 / v_1^2\right) \left(1 + \omega^2 / v_2^2\right)} \cdot \frac{4\pi k^2 \exp\left(-k^2 / k_m^2\right)}{k \sigma_v \left(k^2 + k_0^2\right)^{11/6}} + \frac{dv}{k \sigma_v \left(k^2 + k_0^2\right)^{11/6}}$$

Гроза 1 июня 2015. Электрическое поле







Cloud electrical environment



An isolated thundercloud in central New Mexico, with a rudimentary indication of how electric charge is thought to be distributed inside and around the thundercloud, as inferred from the remote and in situ observations. Adapted from Krehbiel (1986).



A vertical tripole representing the idealized gross charge structure of a thundercloud such as that shown in the left panel; the negative screening layer charges at the cloud top is ignored here.



Conceptual model of the electrical structure in mature, mid-latitude convection. Four main charge regions (with red + for positive charge, blue – for negative charge) are typically found in soundings through updrafts, while soundings outside updrafts have at least six charge regions in common. Representative electric field (E) and electrostatic potential (V) profiles in the nonupdraft (left) and updraft (right) of the convective region are also shown; the altitudes in these soundings do not correspond exactly to the conceptual model. Schematic representations of an intracloud flash (in green) and a cloud-to-ground flash (in purple) are shown as they might appear in lightning mapping data (**Stolzenburg and Marshall, 2009**)

VHF mapping: LMA





SMART-RD at 201108/01 (9:3001.Field: DB_DBZ_08.3 degrees AELMA.evens from 201108/05 (9:3231 to 201108/05 (9:34:0), and 10.3 km/sees radar every plane.



Влияние нижнего слоя положительного заряда в грозовом облаке на типологию и динамику молниевого разряда

В рамках новой трехмерной модели развития молнии, включающей двунаправленное распространение разряда, его динамическое вероятностное ветвление и возможность одновременного роста и/или распада периферийных ветвей, а также впервые учитывающей эволюцию проводимости, продольного электрического поля и тока разрядных каналов, продемонстрировано доминирующее влияние на типологию и динамику молниевого разряда нижнего слоя положительного заряда в грозовом облаке. Обнаружено, что этот слой способствует зарождению отрицательного нисходящего лидера, но в случае избыточной мощности слоя предотвращает возникновение отрицательного разряда типа облако – земля, блокируя нисходящий лидер. Значительное уменьшение или отсутствие нижнего слоя положительного заряда в грозовом облаке также исключает отрицательный разряд на землю и приводит к развитию внутриоблачного разряда нормальной полярности. Предсказания модели и результаты её численных реализаций соответствуют экспериментальным данным.

Авторы: Д.И. Иудин, В.А. Раков, Е.А. Мареев, А.А. Сысоев, С.С. Давыденко (ИПФ РАН), Ф.Д. Иудин (ННГУ)

Публикации: Iudin,D.I., V.A.Rakov, E.A.Mareev, F. D. Iudin, A. A. Syssoev, and S. S. Davydenko (2017), Advanced numerical model of lightning development: Application to studying the role of LPCR in determining lightning type, J. Geophys. Res. Atmos., 122, 6416–6430, doi:10.1002/2016JD026261. Iudin D.I., F.D. Iudin, and M. Hayakawa, Modeling of the intracloud lightning discharge radio emission, Radiophysics and Quantum Electronics, Vol.58, No.03, August, 2015 (Russian Original Vol. 58, No. 03, March, 2015), doi:10.1007/s11141-015-9591-4.

Развитие молнии при различных конфигурациях слоев заряда в облаке



Молния - конец XIX в.

Комната и сад уже потонули в темноте от туч, в саду, за открытыми окнами, все шумело, трепетало, и меня все чаще и ярче озаряло быстрым и в ту же секунду исчезающим зелено-голубым пламенем. Быстрота и сила этого безгромного света все увеличивались, потом комната озарилась вдруг до неправдоподобной видимости, на меня понесло свежим ветром и таким шумом сада, точно его охватил ужас: вот оно, загорается земля и небо! Я вскочил, с трудом затворил одно за другим окна, ловя их рамы, преодолевая трепавший меня ветер, и на цыпочках побежал по темным коридорам в столовую: мне, казалось бы, было в тот час не до раскрытых окон в столовой и гостиной, где буря могла перебить стекла, но я все-таки побежал и даже с большой озабоченностью. Все окна в столовой и гостиной оказались закрыты — я увидал это при том зелено-голубом озарении, в цвете, яркости которого было поистине что-то неземное, сразу раскрывавшееся всюду, точно быстрые глаза, и делавшее огромными и видимыми до последнего переплета все рамы, а затем тотчас же затоплявшееся густым мраком, на секунду оставлявшее в ослепшем зрении след чего-то жестяного, красного.

Атмосферное электричество НВ2018



Серебряный век

Желтел, облака пожирая, песок. Предгрозье играло бровями кустарника, И небо спекалось, упав на кусок Кровоостанавливающей арники.

Гроза в воротах! на дворе! Преображаясь и дурея, Во тьме, в раскатах, в серебре, Она бежит по галерее.

По лестнице. И на крыльцо. Ступень, ступень, ступень. — Повязку! У всех пяти зеркал лицо Грозы, с себя сорвавшей маску.

Так приближается удар За сладким, из-за ширмы лени, Во всеоружьи мутных чар Довольства и оцепененья.

Berger et al. (1975) data for peak current



Lightning peak currents for first strokes vary by a factor of 50 or more, from about 5 to 250 kA.

The probability of occurrence of a given value rapidly increases up to 25 kA or so and then slowly decreases. Statistical distributions of this type are often assumed to be lognormal.

$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma I}} \exp\left\{-\frac{(\ln I - \ln I_0)^2}{2\sigma^2}\right\} \qquad I(kA) = 10.6 Q^{0.7}.$$

Cumulative statistical distributions of lightning peak currents, giving percent of cases exceeding abscissa value, from direct measurements in Switzerland (Berger et al. 1975). The distributions are assumed to be lognormal and given for (1) negative first strokes (N=101), (2) positive first strokes (N=26), and (3) negative subsequent strokes (N=135).

Summary of Lightning peak current values

The median (50%) and severe (1%) lightning currents at ground appear to be: 30 kA and 150 kA for negative first strokes, 10-15 kA and 50 kA for negative subsequent strokes, 35 kA and 500 kA for positive first strokes (as follows from lognormal distributions)



Conceptual model of the electrical structure in mature, mid-latitude convection. Four main charge regions (with red + for positive charge, blue – for negative charge) are typically found in soundings through updrafts, while soundings outside updrafts have at least six charge regions in common. Representative electric field (E) and electrostatic potential (V) profiles in the nonupdraft (left) and updraft (right) of the convective region are also shown; the altitudes in these soundings do not correspond exactly to the conceptual model. Schematic representations of an intracloud flash (in green) and a cloud-to-ground flash (in purple) are shown as they might appear in lightning mapping data (**Stolzenburg and Marshall, 2009**)

Peak current distribution and its genesis

$$P(E,\tau_0) = \begin{cases} 0, & 0 \le E \le E_0, \\ \frac{E-E_0}{E_1-E_0}, & E_0 < E \le E_1, \\ 1, & E > E_1; \end{cases} \qquad P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma I}} \exp\left\{-\frac{(\ln I - \ln I_0)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

$$\begin{split} F_E(\epsilon) &= 1 - \lim_{\eta \to \epsilon + 0} \exp\left(\int_0^{t(\eta)} \ln\left(1 - P(E(\tau), \tau_0)\right) \frac{d\tau}{\tau_0}\right) \\ &= 1 - \lim_{\eta \to \epsilon + 0} \exp\left(\frac{1}{\tau_0} \int_{E(0)}^{\eta} \ln\left(1 - P(E', \tau_0)\right) \frac{dt}{dE}(E') dE'\right) \end{split}$$

$$F_E(\epsilon) = \begin{cases} 1 - \exp\left(\frac{1}{k\tau_0}\left(\epsilon - E_0 + (E_1 - \epsilon)\ln\frac{E_1 - \epsilon}{E_1 - E_0}\right)\right), & E_0 \le \epsilon < E_1, \\ 1, & \epsilon \ge E_1. \end{cases}$$

Statistical distributions of lightning peak currents: Why do they appear to be lognormal?



N. Slyunyaev, E. Mareev, V. Rakov, and G.Golitsin, 2017

Histograms derived from Berger et al. (1975)





- The CIGRE Broshure #549 (2013) recommends the use of direct current measurements.
- The median (50%) and severe (1%) lightning currents at ground appear to be:
 - 30 kA and 150 kA for negative first strokes,
 - 10-15 kA and 50 kA for negative subsequent strokes,
 - 35 kA and 500 kA for positive first strokes (as follows from lognormal distributions)
- The maximum directly measured peak current to date is about 300 kA, and it is for positive lightning.
- For negative lightning, the maximum directly measured peak current is about 200 kA.

Газодинамика канала молнии



$$-\nabla \cdot \left(\frac{1}{3\overline{\sigma}^{i}}\nabla E_{R}^{i}\right) = 4\pi\overline{\sigma}^{i}\left(B^{i}\left(v^{i},T\right) - E_{R}^{i}\right)$$

Ripoll et al., 2014 (I)

| Channel characteristics | Pre-dart-leader channel (ahead of dart-leader front) | Pre-return-stroke channel (behind dart-leader front and ahead of return-stroke front) | Return-stroke channel (behind return-stroke front) |
|---------------------------------|--|--|--|
| Temperature, K | $\sim 3000 \\ \sim 0.02 \\ \sim 3 \\ \sim 18000$ | ≥ 20000 | ≥ 30000 |
| Conductivity, S m ⁻¹ | | $\sim 10^4$ | $\sim 10^4$ |
| Radius, cm | | ~ 0.3 | ~ 3 |
| R , Ω m ⁻¹ | | ~ 3.5 | ~ 0.035 |

$$i(x,t) = \frac{U_i e^{-at}}{Z} I_0(a\sqrt{t^2 - x^2/v^2}),$$

$$a = \frac{R_0}{2L_0}, \quad v = (L_0 C_0)^{-1/2}, \quad Z = \left(\frac{L_0}{C_0}\right)^{1/2}, \quad x \le vt < H_1$$

$$i_{\phi} = -\frac{U_i}{Z}e^{-at} = -\frac{U_i}{Z}\exp\left(-\frac{R_0 x_{\phi}}{2Z}\right)$$

$$i(0,t) \approx \frac{U_i}{Z(2\pi a t)^{1/2}} = \frac{U_i}{Z(\pi R_0 x_{\phi}/Z)^{1/2}}$$

$$i(t) = I_{M}t/t_{\Phi}$$
 при $t \leq t_{\Phi}$, $i(t) = I_{M} \exp[-(t - t_{\Phi}/t_{\Theta})]$ при $t > t_{\Phi}$.



Электродинамика канала молнии



Sources of the secondary cosmic rays detected on the Earth's surface (Chilingarian, JASTP, 2014)





Courtesy of Dr. K.L.Cummins and Vaisala VLF: 3-30 kHz; LF: 30-300 kHz; VHF: 30-300 MHz

GOES-R



Атмосферное электричество НВ2018

Семинар 3 марта

•Иудин Д.И., Физика и геометрия неравновесных фазовых переходов индуцированных шумом

•Кутерин Ф.А., Евтушенко А.А., Слюняев Н.Н., О численном моделировании дневного и ночного спрайта

•Ильин Н.В., Машинное обучение в задачах прогноза молниевой активности

•Дементьева С.О., Мареев Е.А., О роли турбулентности при электризации в дисперсных многофазных средах

•Булатов А.А., Иудин Д.И., Транспортная самоорганизующаяся модель инициации молнии

Стендовая сессия 2 марта

Сысоев А.А., Иудин Д.И., Давыденко С.С., Раков В.А., Моделирование динамики развития отрицательного ступенчатого лидера молнии
Свечникова Е.К., Мареев Е.А., Моделирование разряда с релятивистской обратной связью с применением для оценки электрической структуры грозового облака

Молния: фундаментальные проблемы

- молния: проблема инициации;
- молния: формирование лидера, возвратный удар и Мкомпонента;
- рентгеновское и гамма излучение; мощные вспышки радиоизлучения;
- высотные разряды: теоретическое и лабораторное моделирование;
- формирование электрической структуры облаков и мезомасштабных конвективных систем;
- молнии с экстремальными параметрами;
- глобальная электрическая цепь;
- > атмосферное электричество и климат.



Пронесшейся грозою полон воздух. Все ожило, все дышит, как в раю. Всем роспуском кистей лиловогроздых Сирень вбирает свежести струю.

Все живо переменою погоды. Дождь заливает кровель желоба, Но все светлее неба переходы, И высь за черной тучей голуба.

Рука художника еще всесильней Со всех вещей смывает грязь и пыль. Преображенней из его красильни Выходят жизнь, действительность и быль. Воспоминание о полувеке Пронесшейся грозой уходит вспять. Столетье вышло из его опеки. Пора дорогу будущему дать.

Не потрясенья и перевороты Для новой жизни очищают путь, А откровенья, бури и щедроты Душе воспламененной чьей-нибудь.