

Особенности применения электронно-оптических камер для исследования молнии и длинной искры

В.Б. Лебедев ^а, Г.Г. Фельдман ^а, Б.Н. Горин ^а, Ю.В. Щербаков ^б, В.С. Сысоев ^б,
В.А. Раков ^в

^а ВНИИОФИ, Компания БИФО; ^б ВНИЦ ВЭИ, ^в Университет Флориды (США)

Введение

Настоящий доклад обобщает материалы публикаций /1-3/. При этом /1 и 3/ были представлены на соответствующих симпозиумах только в качестве стендовых сообщений и широко не обсуждались.

Создание достоверных физических и инженерных моделей последовательности лидер-обратный удар (L-RS) молнии и процесса поражения (attachment process) ею объектов, в которые она попадает, затруднено недостатком фактических сведений об оптической картине слабосветящихся стримерных структур молнии. Альтернативой традиционным оптико-механическим средствам регистрации изображения молнии являются камеры на основе ЭОП /4/. Такие камеры позволили получить новые результаты при исследовании стримерных процессов длиной искры, что позволило сформулировать ряд гипотез, относящихся к лидерному процессу молнии /5-7/.

Здесь приводятся характеристики комплекса электронно-оптической аппаратуры, приспособленного для работы с молнией и длинной искрой, а также представлены результаты его испытаний во Всероссийском Электротехническом Институте (ВЭИ) им. В.И. Ленина при регистрации длиной искры на открытом высоковольтном стенде в г.Истра под Москвой.

Параметры аппаратуры и режимы её применения

Комплекс электронно-оптической аппаратуры состоял из трёх камер (K004M, K008 и ФЭР-14М) и специального двухканального фотодатчика ФД001 (рис.1 и 2).

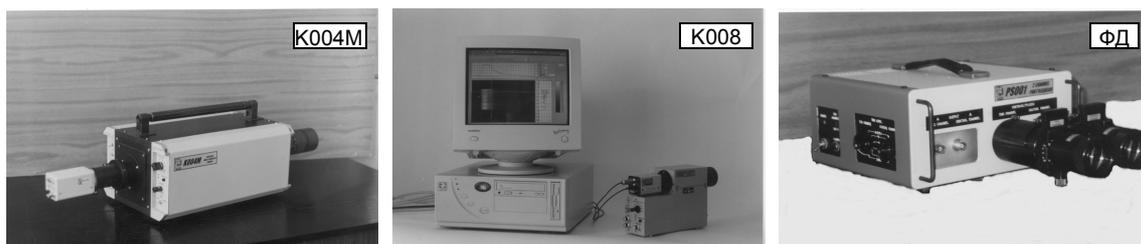


Рис.1. Внешний вид камер K004M, K008 и фотодатчика ФД001.

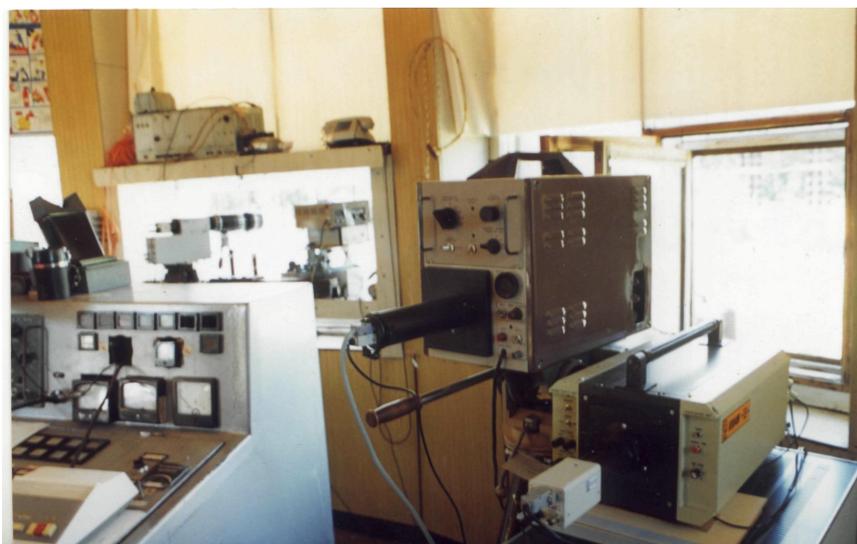


Рис.2. Общий вид комплекса электронно-оптической аппаратуры.

Детальные характеристики камер приведены в таблице.

Таблица

1	Тип камеры	K004M	K008	ФЭР-14М
2	Спектральный диапазон, нм	250 ÷ 800	400 ÷ 800	400 ÷ 800
3	Рабочее поле фотокатода ЭОП, мм ²	8×8	15×20	8×8
4	Рабочее поле экрана ЭОП, мм×мм: - при линейной развёртке - при кадровой развёртке	35×16 28×28	20×12 15×20	35×16 -
5	Число микроканальных пластин (МКП)	2	1	2
6	Коэффициент преобразования, Вт/Вт	0 ÷ 10 ⁶	0 ÷ 10 ⁴	0 ÷ 10 ⁶
7	Число пикселей ПЗС телекамеры	640×480	640×480	1388×1024
8	Пространственное разрешение на фотокатоде ЭОП, п.л./мм	10	12	15
9	Линейная развёртка, мкс/экран	0,35 ÷ 10 ⁴	2×10 ⁻³ ÷ 0,2 0,2 ÷ 6×10 ²	1,0 ÷ 10 ⁴
10	Однокадровый режим, длительность кадра, мкс	0,35 ÷ 10 ⁴	10 ⁻² ÷ 0,2 0,2 ÷ 6×10 ²	-
11	Многокадровый режим, длительность кадра, мкс	0,1 ÷ 10	-	-
12	Пауза между кадрами, мкс	0,5 ÷ 10 ³	-	-
13	Число кадров	1,2,4,6,9	1	-
14	Режим снижения усиления яркости	есть	нет	есть

Регистрация осуществлялась одновременно всеми тремя камерами, работавшими в разных режимах. При этом камера K004M, разработанная компанией БИФО для Университета Флориды специально для регистрации триггерных молний, преимущественно использовалась в многокадровом режиме, камера K008 в однокадровом, а камера ФЭР-14М только в режиме линейной развёртки, поскольку других режимов не имела. Основой ФЭР-14М являлась камера ФЭР-14, разработанная и изготовленная во ВНИИОФИ ещё в 1983г /8/. Для этих экспериментов в этой старой, но надёжной камере фотоприставка была заменена современной ПЗС телекамерой.

Необходимость регистрации одновременно несколькими камерами, работающими в различных режимах, обусловлена несколькими обстоятельствами. Режим покадровой регистрации позволяет получать информацию об исследуемом процессе по двум пространственным координатам, но только в отдельные дискретные моменты времени. Режим линейной развёртки позволяет получать только одномерную пространственную информацию, но зато непрерывную во времени.

Яркость изображения электрического пробоя в длинных воздушных промежутках подвержена по мере его развития очень сильной флуктуации (см., например, рис.5а). Поэтому при покадровой регистрации короткие вспышки в течение стримерно-лидерной стадии могут попадать в межкадровые интервалы (паузы) (см. рис.6б, кадр №6). При этом важная информация может оказаться полностью потерянной. Она не будет потеряна при регистрации в режиме линейной развёртки. Но, если в какие-то моменты времени в разрядном промежутке одновременно возникнут расположенные рядом друг с другом две вспышки или более, то их изображения при линейной развёртке могут взаимно наложиться и пространственная информация может оказаться потерянной или искажённой. При одновременной регистрации двумя камерами, одна из которых работает в режиме многокадровой, а другая в режиме линейной развёртки, полученные информации дополняют друг друга и позволяют избежать заблуждений. Кроме того, канал молнии или разряда в длинном промежутке – это не прямая линия, как щель в стрик камере, ориентированная перпендикулярно направлению развёртки. Канал имеет сложную изломанную форму. Он или его отдельные участки при линейной развёртке могут иметь как положительную, так и отрицательную проекцию на ось времени. Не имея точной информации о форме канала, а при линейной развёртке она в большинстве случаев остаётся неизвестной, нельзя в результате обработки фотохронограммы получить достоверные данные о скорости распространения свечения. Только в сочетании с камерой, работающей в режиме покадровой регистрации, может быть получена точная информация о форме канала и соответственно достоверные данные о скорости распространения свечения.

Максимальный коэффициент преобразования (усиление яркости) ЭОП при двух МКП составляет 10^6 Вт/Вт. Это позволяет регистрировать изображение стримерной - чрезвычайно слабосветящейся стадии пробоя. Благодаря тому, что коэффициент преобразования можно уменьшать в процессе регистрации посредством импульсного ступенчатого снижения напряжения на МКП, камеры позволяют получать за один акт регистрации нормальные изображения и стримерно-лидерной стадии пробоя, и стадии последующего мощного дугового разряда, яркости которых отличаются на много порядков.

Пространственное разрешение камер на фотокатоде ЭОП, составляет не менее 10п.л./мм. Это по количеству разрешаемых в рабочем поле фотокатода элементов соответственно в 25 (K004M), ~50 (ФЭР-14M) и ~150 (K008) раз лучше чем у известного японского прибора ALPS /9,10/ с числом ПИН-фотодиодов 16×16. Возможность регистрации в ультрафиолетовом диапазоне

является также существенным преимуществом электронно-оптических камер перед ALPS.

Для управления камерами был разработан высокочувствительный фотодатчик, имеющий два идентичных канала на основе ФЭУ. Входная оптика позволяет наводить каждый канал в вертикальной плоскости на требуемую область пространства. Перископическое устройство, вставляемое поочередно в каждый канал, позволяет осуществлять прицельную наводку каналов. Выходной сигнал ФЭУ поступает на компаратор с регулируемым уровнем срабатывания и далее на формирователь выходных импульсов. Первый канал фотодатчика запускает камеры, второй при увеличении яркости регистрируемого объекта выше критической, при которой изображение на выходе камеры начинает насыщаться, запускает в камере схему снижения усиления яркости. Степень снижения усиления яркости может регулироваться в широких пределах вплоть до полного запираания ЭОП. Чувствительности каналов фотодатчика регулируются как оптикой – нейтральными, цветными и интерференционными светофильтрами, щелями и диафрагмами, так и электроникой - установкой уровня срабатывания компараторов. Таким образом, имеется возможность пространственной, спектральной и амплитудной селекции входного сигнала фотодатчика.

Исследования длинной искры проводились на высоковольтном стенде «ГИН 6МВ» как в ночное, так и в дневное время. Схема расположения основных частей «ГИН 6МВ» показана на рис.3.

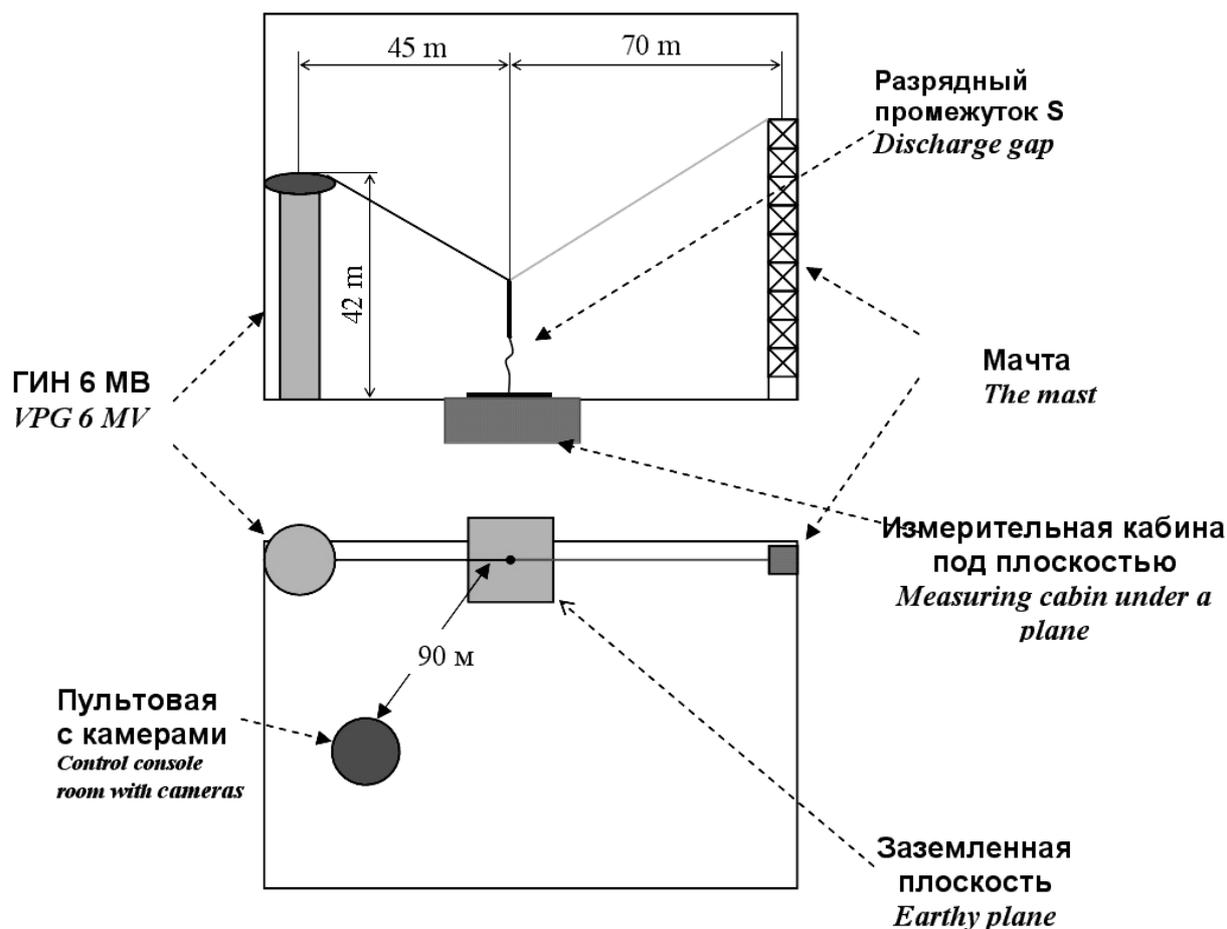


Рис.3. Схема расположения основных частей «ГИН 6МВ»

Искра длиной до 6 метров возбуждалась в промежутках двух конфигураций – стержень-плоскость и стержень-стержень. Во втором случае стержень длиной ~1м устанавливался на плоскость. Использовались импульсы напряжения положительной и отрицательной полярности с фронтом 15 и 130 мкс и временем полупада 7500 мкс ($\pm 15 \div 130 / 7500$ мкс).

Комплекс регистрирующей аппаратуры был установлен в пультовой на расстоянии 90м от разрядного промежутка. Запуск камер осуществлялся только с помощью фотодатчика. В дневное время для уменьшения или полного исключения негативного влияния постоянного светового фона на работу аппаратуры применялась селекция: спектральная для камер, спектральная и пространственная для фотодатчика. Пространственная селекция заключалась в том, что поле зрения первого канала фотодатчика уменьшалось так, что он «видел» только конец стержня, на который подавался импульс ГИНа. Это в сочетании со спектральной селекцией (использование интерференционного УФ фильтра) позволяло сохранять высокую чувствительность канала и даже в яркий солнечный день запускать камеры от слабой вспышки начальной короны на конце стержня.

Результаты исследований длинной искры

На рис.4 показаны 4 кадра, иллюстрирующих развитие отрицательного лидера в течение ~20мкс в промежутке стержень-стержень. Они сделаны камерой K008 в однокадровом режиме. Использовался длиннофокусный

($f=300\text{мм}$) объектив и интерференционный фильтр ($\lambda=413\text{нм}$). Кадры относятся к разным разрядам. Но за счёт последовательного увеличения задержки запуска получилось как бы временное сканирование лидерного процесса. Кадры демонстрируют следующие картины: (a) - канал и отрицательные стримеры в начале лидера, (b) - ступень l отрицательного лидера с мощной вспышкой стримеров, (c) - переход процесса в сквозную стримерную фазу за счёт слияния отрицательной и положительной стримерных зон, (d) - встречу каналов нисходящего отрицательного и восходящего положительного лидеров.

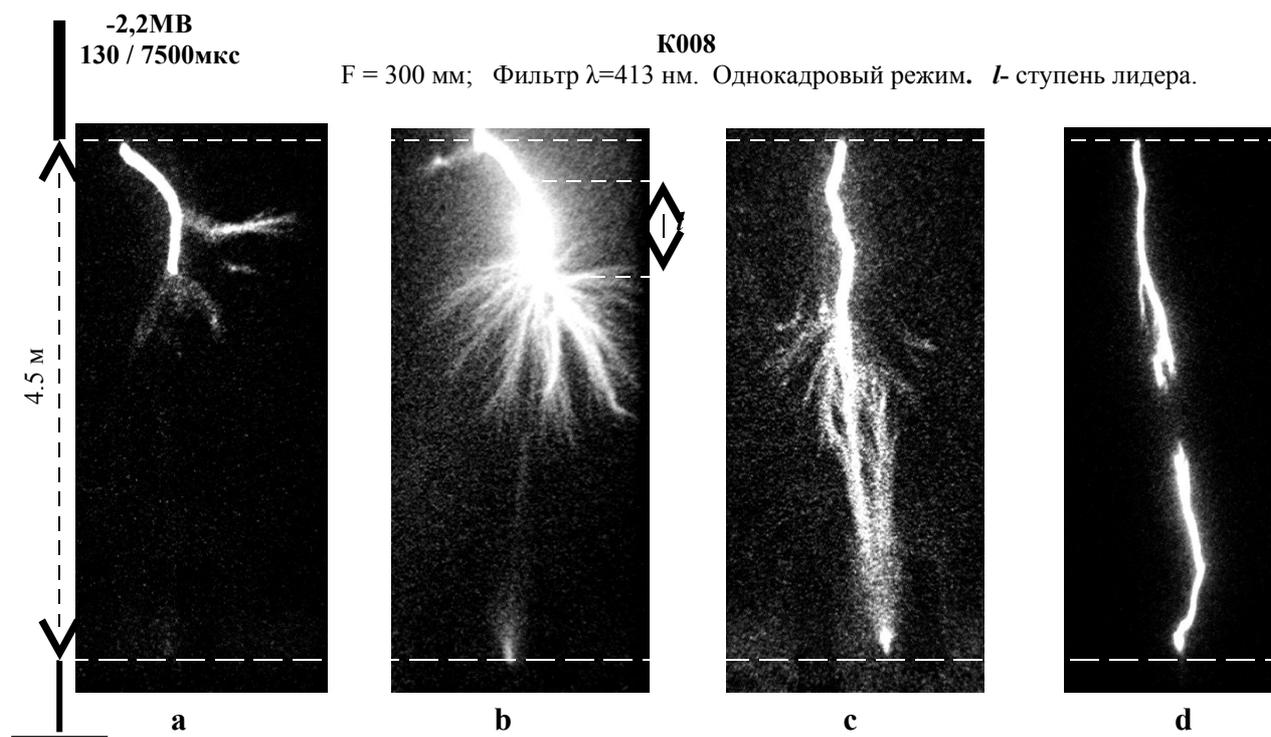


Рис.4. Развитие отрицательного разряда в промежутке стержень-стержень. Дневные фото (позитив). Длительность кадра: a,b,c – 2мкс; d – 0,5мкс.

Были проведены регистрации и положительного лидера.

Нужно отметить, что положительный лидер в длинном воздушном промежутке с резконеоднородным полем исследовался во многих лабораториях. Связано это с тем, что именно в таких промежутках наблюдается наиболее низкая электрическая прочность. Так в /11-14/ были подробно исследованы как электрические характеристики таких промежутков, так и линейные развёртки во времени оптических картин развития лидерного процесса. Однако одновременной регистрации изображения одного и того же разряда в режиме линейной и покадровой развёртки сделано не было.

На рис.5 показана картина положительного разряда в промежутке стержень-плоскость, полученная с помощью 3-х камер, работавших синхронно. Камера ФЭР-14М зарегистрировала в режиме линейной развёртки непрерывную картину развития разряда, начиная от короны и кончая дугой. Камера K004M дала 9-ти кадровую картину развития разряда, в частности, эволюцию стримерной зоны вплоть до начала дуги. 9-й кадр получился

пересвеченным, так как установленная для дуговой стадии разряда степень снижения усиления яркости оказалась недостаточной. Камера K008 дала один крупноформатный кадр, полученный через 110 мкс после запуска камер ФЭР-14М и K004М. Он соответствует 8-му кадру камеры K004М. Заметим, что лидер до перехода в дуговую стадию развивается при токе ~ 1 А и светится очень слабо. Тем не менее, с помощью всех 3-х камер его канал и стримерная зона хорошо регистрируются даже с расстояния 90 метров.

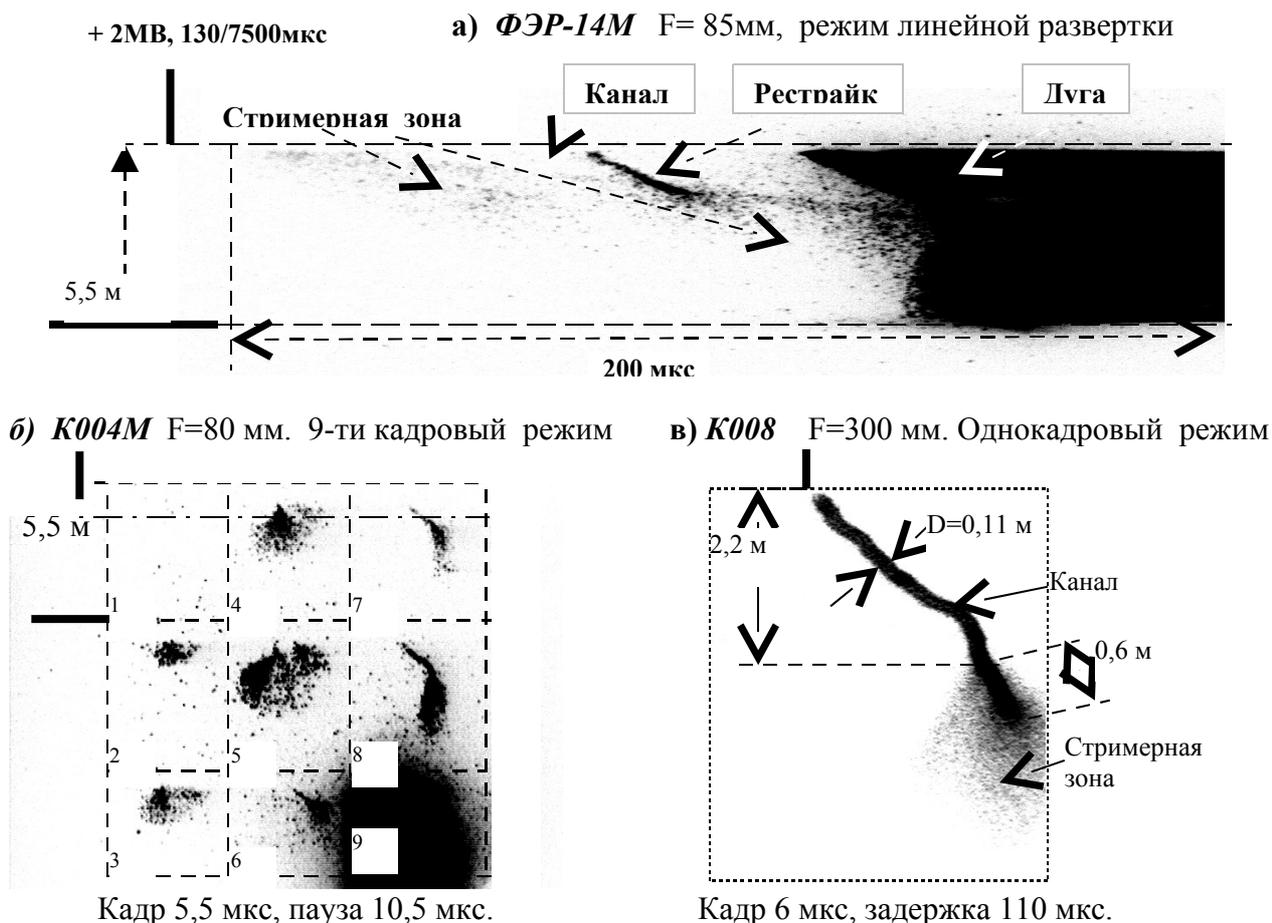
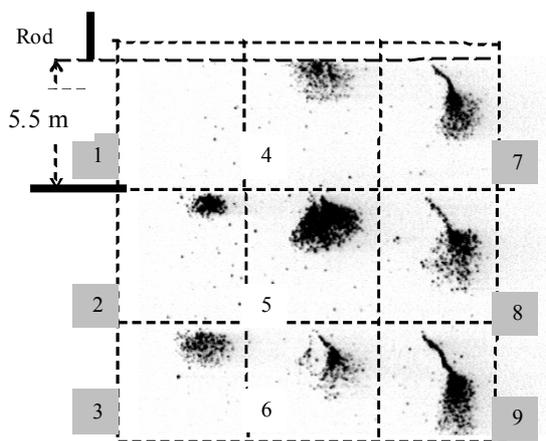
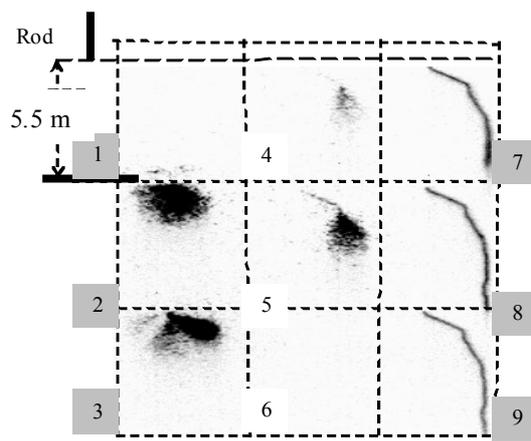


Рис.5. Синхронные фото (негатив) развития положительного лидера в промежутке стержень-плоскость, полученные тремя камерами для одного и того же разряда.

На рис.6 приведены типичные картины положительного разряда в разных стадиях. При этом кадры 7-9б зафиксировали дуговую стадию разряда без пересветки изображения.



а) кадр 5мкс, пауза 8мкс.



б) кадр 8мкс, пауза 15мкс.

Рис.6. Камера К004М: типичные картины (негатив) развития положительного разряда при импульсе напряжения $+U=2\text{МВ}$, 130/ 7500мкс.

На рис.7 приведены типичные картины (позитив) развития положительного лидера, сделанные в крупном формате с помощью камеры К008.

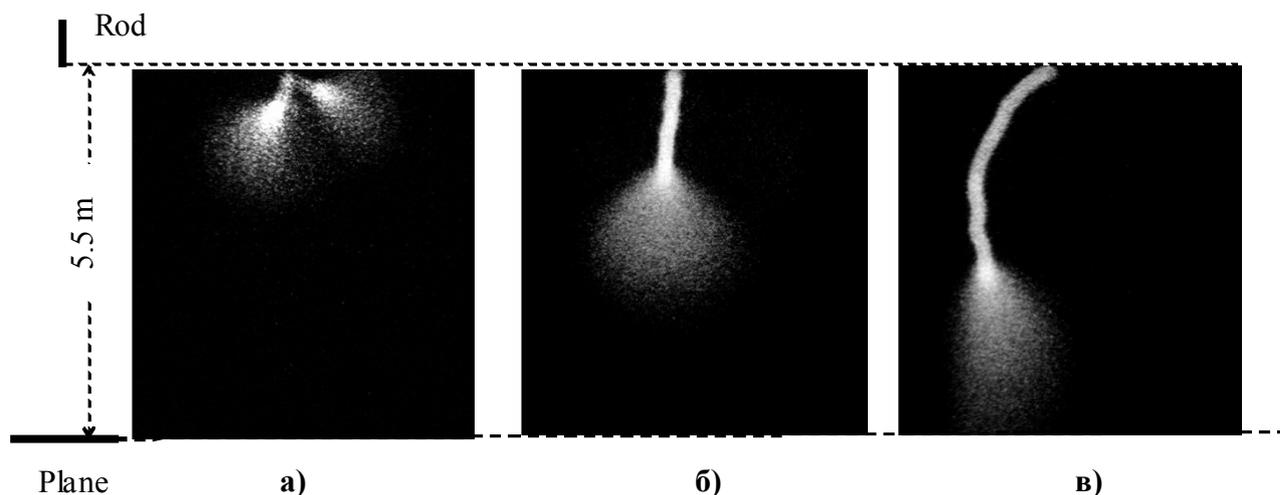


Рис.7. Камера К008: типичные картины развития положительного лидера при импульсе напряжения $+130/7500\text{мкс}$, $U=2\text{МВ}$ (позитивное изображение, длительность кадра 6мкс). Снимки относятся к разным разрядам: а) - начало, б) - середина, в) - конец лидерной стадии.

Обработка массива таких снимков показывает, что в начале устойчивого развития положительного лидера длина его стримерной зоны составляет $\sim 1,5\text{м}$, в середине промежутка $\sim 2\text{м}$, в конце $\sim 2,5\text{м}$. Эти данные соответствуют данным, полученным в [11].

Нужно отметить, что на снимках, сделанных камерой К004М (рис.5б и рис.6), стримерная зона в начале движения лидера выглядит как коническая область с углом при вершине почти 180° . Однако снимки с более высоким пространственным разрешением, полученные с помощью камеры К008 (рис.5в и 7), показывают, что это происходит из-за пространственного наложения

стримерных зон одновременно развивающихся двух и более лидерных каналов, которые воспринимаются при недостаточном пространственном разрешении как единая стримерная зона. Эти измерения позволяют утверждать, что стримерная зона отдельного положительного лидерного канала в течение всего времени его движения в промежутке имеет коническую форму с углом при вершине, всегда меньшим 90° .

На рис.5а и 5в зафиксировано ускорение движения лидерного канала в середине промежутка. Увеличение длины канала на рис.5в составляет $\sim 0,6$ м за бмкс. При этом среднюю скорость движения канала на этом участке можно оценить величиной, не меньшей чем 10^5 м/с.

Особо следует отметить, что с помощью камеры К008 /15/ удалось получить очень четкую оптическую картину канала положительного лидера с высоким пространственным разрешением (рис.5в и 7). Это, в частности, позволило измерить оптический диаметр канала, который оказался неожиданно большим, флуктуирующим от разряда к разряду от 10 до 20см.

Выводы

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1. Оптическая картина развития положительного лидера в исследованном промежутке практически одинакова для импульсов с фронтом 15 и 130мкс.
2. Стримерная зона каждого отдельного положительного лидера представляет собой область в виде конуса, угол при вершине которого никогда не превышает 90° .
3. Оптический диаметр положительного лидера на всей длине промежутка практически одинаков, лежит в диапазоне 10-20см и флуктуирует от разряда к разряду. При этом яркость канала лидера не сильно отличается от яркости средней части его стримерной зоны.
4. В процессе движения положительного лидера зафиксированы быстрые изменения длины его канала, которые происходят со скоростью не менее 10^5 м/с.
5. Закономерности развития отрицательного лидера более сложны чем положительного и требуют отдельного тщательного исследования.

Заключение

Для регистрации молнии предпочтительным представляется режим одновременного использования 3-х камер, подобный изображённому на рис.5. При регистрации естественной молнии проблемой будет «поймать» пространственное окно с нужным участком и нужной временной фазой молнии. Ситуация существенно упрощается при регистрации триггерной молнии, нижняя часть канала которой жёстко привязана к определённому месту, а форма канала до высоты в несколько сотен метров изломана существенно меньше чем в случае естественной молнии.

Литература

1. Shcherbakov Y.V., Lebedev V.B., Rakov V.A., Feldman G.G., Sucharevskij D.I., Gorin B.N., Syssoev V.S., Karpov M.A., Senik A.V., High-speed optical studies of long spark (Istra, Russia) and triggering lightning (Camp Blanding, Florida): Initial results, SPIE, Vol. 4948 , pp. 837 – 845.
2. B.N. Gorin, M.A. Karpov, V.B. Lebedev, G.G. Feldman, V.S. Syssoev, Y.V. Shcherbakov, V.A. Rakov, Development and test of image converter cameras with image intensification for Lightning and long spark study, Collection of scientific papers entitled “The 5th Russian Conference on Atmosphere Electricity”, Vladimir, Russia, Vol.1, pp. 263-269.
3. V.S. Syssoev, Y.V. Shcherbakov, B.N. Gorin, V.B. Lebedev, V.A. Rakov, Dynamics of the streamer zone of the positive leader in a long air gap, Proceedings of the international Conference on Lightning and Static Electricity - ICOLSE 2003, Blackpool, UK, 16–18 Sept., paper 103-58jb PMY.
4. М.М. Бутслов, Б.М. Степанов, С.Д. Фанченко, «Электронно-оптические преобразователи и их применение в научных исследованиях», М. Наука, 1978, стр.431.
5. Э.М. Базелян, Б.Н. Горин, В.И. Левитов, «Физические и инженерные основы молниезащиты», Л. Гидрометеиздат, 1978, стр. 223.
6. B.N. Gorin, A.V. Shkiljov, Picture of lightning discharge which might be seen with the help of image converter camera, Proc.of the 23-rd Int. Congr. On High-Speed Photography and Photonics, Moscow, 1998, SPIE, Vol. 3516, pp. 355-341.
7. Э.М. Базелян, Ю.П. Райзер, Физика молнии и молниезащиты, М. Физматгиз, 2001, стр. 320.
8. A.R. Koriavin et al, Application of image converter streak camera FER-14 in investigations on discharges process pattern in long air gaps, SPIE, Vol. 3516, pp.668-685 (pp.178-195 of part 2)
9. D.Wang et al, «Attachment process in rocket - triggered lightning strokes», Journ. Geoph. Res, 1999, Vol.104, N D2, pp. 2143-2150.
10. V.A. Rakov et al, «Lightning properties from triggered – lightning experiments at Camp-Blanding, Florida (1997-1999)», Proc. 25th ICLP, Rhodes, 2000, pp. 54-59.
11. A.B. Lupeiko, V.S. Syssoev, Influence of characteristics of a spark arrester in investigations lightning protection aircrafts on models, The collection of proceedings MPEI, # 231, 1990, pp. 82-89.
12. Les Renardieres Group, Research on Long air gap at Les Renardieres – 1973 Results, Electra 35, 1974, pp. 49-156.
13. A.V. Lupeiko, V.P. Miroschnichenko, V.S. Syssoev, E.N. Chernov, Features of spark discharge development in long air gap under rectangular voltage pulses, Proceedings of the All-Union Symposium on Gas Discharge (Tartu, Estonia, August, 1984), 2: High Pressure Gas Discharge Origin and Development (in Russian), pp. 259-261.

14. B.N. Gorin, A.V. Shkilev, Spark discharge development in long gaps under positive pulse voltage, *Elektrichestvo* (in Russian), # 5, 1974 ,pp. 29-38.
15. K008 Streak and Uniframe Camera, [http: www.bifocompany.com](http://www.bifocompany.com).