

# ПЕРВЫЙ ОПЫТ РЕГИСТРАЦИИ ТРИГГЕРНЫХ И ЕСТЕСТВЕННЫХ МОЛНИЙ ВО ФЛОРИДЕ С ПОМОЩЬЮ РОССИЙСКИХ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАМЕР С УСИЛЕНИЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

*Б.Н. Горин, В.Б. Лебедев, Г.Г. Фельдман.* Компания БИФО, Россия.  
*Р.К. Олсен, В.А. Раков,* Университет Флориды, США.

## Введение

Электронно-оптические камеры (ЭОК) с усилением изображения давно и успешно применяются при исследовании электрических разрядов в лабораторных условиях. Здесь приведены первые результаты испытаний ЭОК К004М и К008, разработанных Компанией БИФО для регистрации с больших расстояний слабосветящихся и кратковременно существующих структур молнии, например, таких как гипотетическая стримерная зона лидера и корона обратного разряда молнии.

Главным элементом ЭОК является электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Оптическое изображение объекта на фотокатоде ЭОП превращается в электронное. Пучок электронов, несущих изображение, фокусируется в ЭОП на входную поверхность микроканальной пластины (МКП). По пути пучок подвергается управлению в поле пластин затвора и развертки. Развернутое электронное изображение поступает на вход МКП, содержащей на одном см<sup>2</sup> до 10<sup>8</sup> усилительных каналов электронного потока. Усиленное изображение переносится с выхода МКП на люминесцентный экран ЭОП и вновь превращается в оптическое. Коэффициент преобразования (усиление яркости) от фотокатода до экрана при двух МКП может достигать 10<sup>6</sup> Вт/Вт. Посредством изменения напряжения на МКП ЭОПы позволяют регулировать коэффициент преобразования как в статическом режиме, так и в динамическом (в процессе регистрации). Блок управления ЭОК обеспечивает работу ЭОП в режимах линейной, однокадровой или многокадровой разверток в нано - микро- и миллисекундном диапазоне времени. В зависимости от входной оптики, материала входного окна и типа фотокатода ЭОП может иметь спектральный диапазон чувствительности от ультрафиолета до инфракрасного.

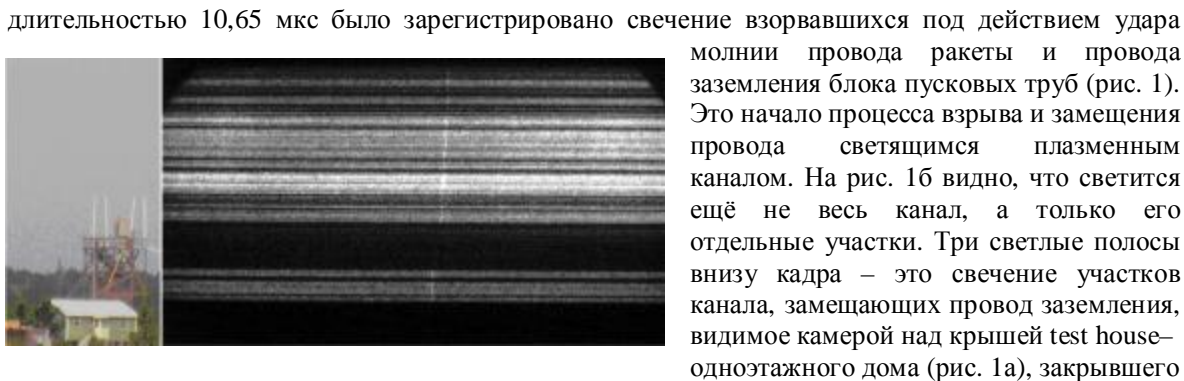
Изображение с экрана ЭОП считывается ПЗС телевизионной камерой (ПЗС ТВК) и вводится в персональный компьютер (ПК), где, кроме визуализации, производится цифровая обработка. Пространственное разрешение ЭОК К004М и К008, приведенное к фотокатоду, составляет не менее 10 пар линий на миллиметр, что как минимум, в 25 раз лучше чем разрешение известного японского прибора ALPS с числом фотодиодов 16х16 [1]. Детальные характеристики указанных ЭОК приведены в [2, 3]. Для управления ЭОК создан фотодатчик (ФД), имеющий два идентичных канала на основе ФЭУ. Первый канал используется для запуска развертки ЭОК, а второй для запуска в ЭОК специальной схемы быстрого (и регулируемого по величине) сброса коэффициента усиления яркости в ходе регистрации, когда яркость разряда возрастает настолько, что изображение в ЭОП может оказаться насыщенным и потерять градации яркости. Оптическая система каждого канала ФД может наводиться на требуемую высоту над землей. Она снабжена набором горизонтальных щелей различной ширины и регулируемой длины, а также набором нейтральных, цветных и интерференционных фильтров. Всё это в сочетании с электронной регулировкой уровня срабатывания канала позволяет осуществлять пространственную, амплитудную и спектральную селекцию входных оптических сигналов, используемых для управления работой ЭОК.

## Регистрация молнии

Испытания ЭОК при регистрации триггерных и естественных молний проводились на полигоне Кэмп Блэндинг во Флориде [4, 5]. ЭОК имели угол зрения 10-15° и в нижней части поля зрения видели стационарную стартовую установку (башню) для запуска ракет, отстоявшую от ЭОК на 475 метров. Первый канал ФД был нацелен на участок пространства, расположенный несколько выше поля зрения ЭОК. Предполагалось, что синхроимпульс от ФД на запуск ЭОК будет выдан при пересечении этого участка либо нисходящим лидером, либо, если этого не случится, яркой головкой идущего вверх обратного разряда. Второй канал, чувствительность которого была загрублена светофильтрами, был нацелен на стартовую установку и должен был срабатывать только от очень яркой вспышки в начале обратного разряда.

### А. Триггерные молнии

Главным преимуществом триггерной молнии является то, что местоположение и время её возникновения точно известны. При опробовании К004М в режиме линейной развертки



**Рис. 1:** а – вид на башню в том же масштабе, в каком её видит камера К004М; б – развёртка (полная длительность 10,65 мкс) изображения взрывающихся провода ракеты и провода заземления блока пусковых труб; вертикальный размер поля зрения – 37,5 м.

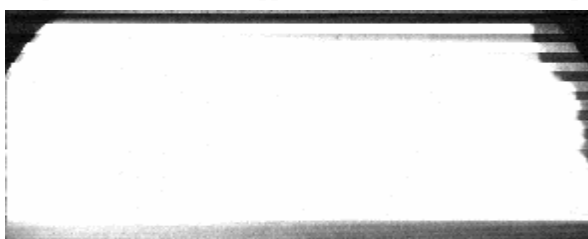
собой вид на нижнюю часть этого провода. Ширина тёмной зоны над этими тремя полосами равна расстоянию от верхнего конца блока пусковых труб на рис. 1а до устройства заземления блока пусковых труб, от которого тонкий провод далее спускается к земле. Над средней тёмной зоной до верха снимка видно свечение отдельных каналов, замещающих провод ракеты. Чуть правее середины развёртки виден небольшой очень короткий всплеск яркости свечения всех каналов, замещающих провод ракеты и провод заземления, как стоп-кадр визуализировавший пространственное положение этих каналов, видимо, под действием всплеска разрядного тока.

Для исключения запуска ЭОК от свечения не интересной начальной фазы молнии, длящейся от момента взрыва провода ракеты до последовательности лидер-обратный разряд, выход первого



**Рис. 2.** Камера К004М: развёртка (длительность 10,65 мкс) начала обратного разряда; вертикальный размер поля зрения ~20 м.

канала ФД был блокирован на время ~300 мс, несколько превышающее длительность этой фазы.



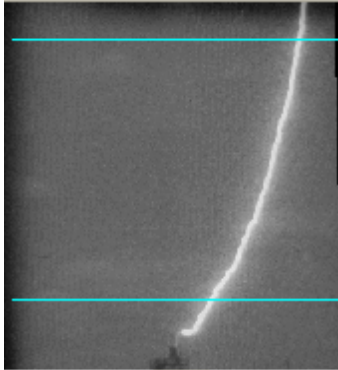
**Рис. 3.** Камера К004М: сброс усиления яркости в конце развёртки (её длительность 10,65 мкс), где лидер перешёл в обратный разряд; вертикальный размер поля зрения ~20 м.

канал ФД запустил ЭОК от свечения нисходящего лидера. Но свечения лидера не видно из-за низкого установленного усиления яркости. Виден только начавшийся обратный разряд. Запуск сброса усиления яркости был отключён. Яркость изображения

насыщенна. Перегрузка фотокатода входным сигналом есть, но небольшая (изображение немного сжалось по вертикали в самом начале обратного разряда, а затем увеличилось – восстановилось. Форма изломанного фронта начала свечения отражает форму канала лидера. Узкая светлая полоса внизу – это отблеск от перил верхней площадки пусковой башни.

На рис. 3 показан снимок, когда ФД запустил камеру от свечения лидера. При этом диафрагма входного объектива камеры была полностью открыта, был включён запуск сброса усиления яркости и установлена большая амплитуда сброса. Видно, что

изображение оказалось насыщенным. Из-за этого пространственной структуры лидера не видно. В конце развёртки, когда начался обратный разряд, сработал сброс усиления яркости почти до нуля. В результате этого прорисовалась форма канала лидера.

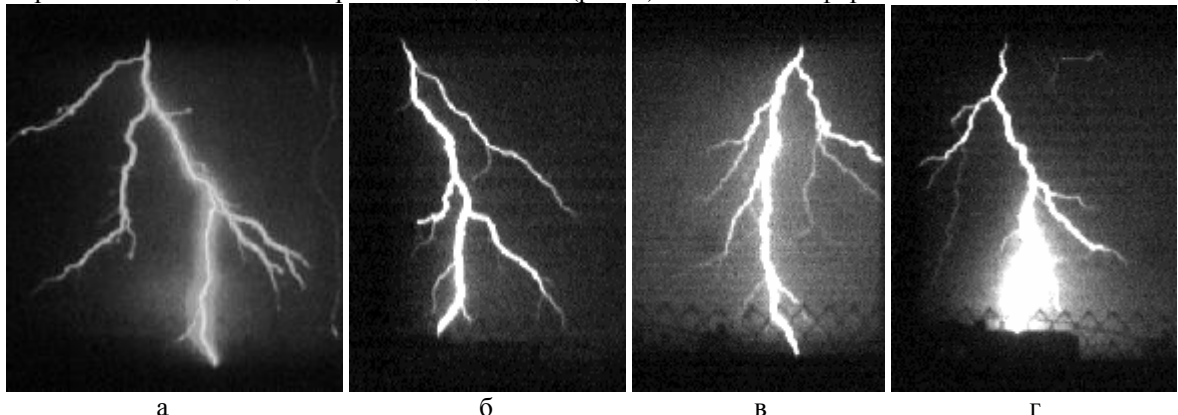


На рис. 4 показан снимок, сделанный камерой K008 в однокадровом режиме (длительность кадра 6 мкс, вертикальный размер молнии ~80 м). Из-за оказавшейся недостаточной в данном случае чувствительности ФД камера зарегистрировала канал лидера не на подходе к башне, как предполагалось, а уже достигший её с наложенным на него более ярким каналом обратного разряда. Из-за этого изображение оказалось насыщенным, видимый диаметр канала неестественно большим ~0,75 м, а общий вид снимка, к сожалению, ничем не отличающимся от снимка, сделанного обычным фотоаппаратом.

**Рис. 4.** Триггерная молния, снятая камерой K008.

### Б. Естественные молнии

В грозовой сезон 2005 года камерой K004M, работавшей в однокадровом режиме с длительностью кадра 13,4 мкс и усилением ~10<sup>4</sup> раз, были зафиксированы 4 естественных молнии, поразившие землю днем на расстоянии до 1 км (рис. 5). Наиболее информативным оказался



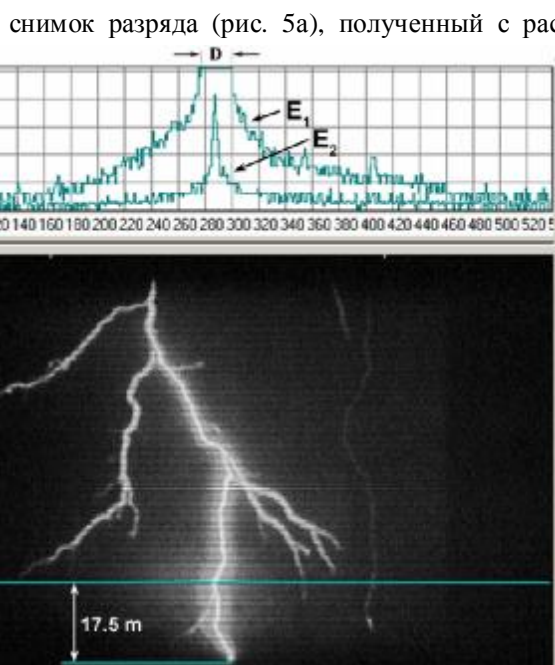
а

б

в

г

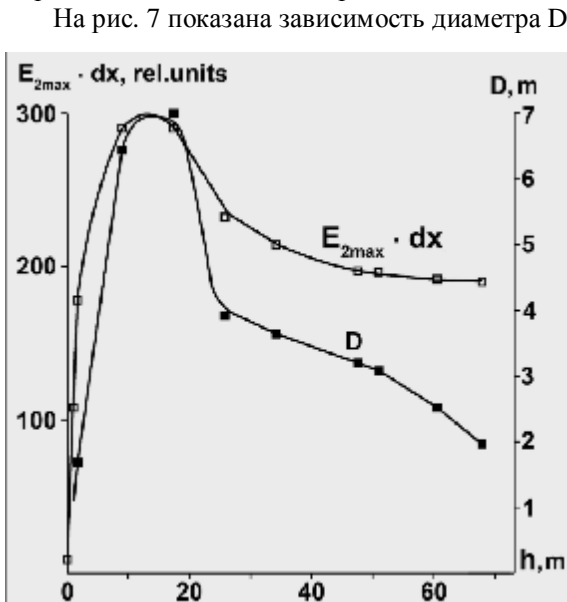
**Рис. 5.** Снимки естественных молний грозового сезона 2005 года: а – 14 июля, б-г – 1 августа (длительность кадра 13,4 мкс, видимый вертикальный размер молний составляет ~ 80 м).



снимок разряда (рис. 5а), полученный с расстояния ~500 м. Синхроимпульс на запуск ЭОК поступил не в лидерной стадии (чувствительность первого канала ФД со светофильтром  $\lambda = 381$  нм оказалась во всех этих 4-х случаях недостаточной), а в начале обратного разряда. Таким образом, полученные изображения созданы излучением света от процессов молнии, протекавших в течение 13,4 мкс с начала обратного разряда. В случае рис. 5а в отличие от рис. 5б-г ПЗС ТВК, работавшая в режиме чересстрочной развёртки, была настроена так, что записала первый полукадр в начале свечения люминесцентного экрана ЭОП, а второй полукадр позже – после существенного затухания свечения экрана. В результирующем изображении виден узкий канал разряда (в задержанном полукадре) и насыщенный по яркости «чехол» свечения вокруг канала разряда (в незадержанном полукадре) с чётко очерченными краями, переходящий в плавно

**Рис. 6.** Снимок молнии от 14 июля (внизу); сверху – профили относительной яркости изображения  $E$  по двум соседним строкам ТВК в самом широком месте «чехла».

затухающее свечение. В верхней части рис. 6 показаны профили относительной яркости изображения  $E$  в единицах восьмиразрядного АЦП на высоте 17,5 м над землей, построенные по двум соседним строкам ( $E_1$  для незадержанного и  $E_2$  для задержанного полукадра). В насыщенном «чехле» шириной  $D \sim 7$  м с яркостью  $E_1 \geq 255$  отсутствуют градации яркости, а убывающее свечение простирается на 25 м от канала, переходя в оптический шум с  $E \sim 15 \pm 5$ . Напротив, в задержанном полукадре  $E_{2max} \sim 210 < 255$ . Поэтому изображение ненасыщено и градации яркости сохраняются даже в центре канала разряда. На профиле яркости видно, что на границе насыщенной зоны, там, где  $E_1 = 255$ ,  $E_2 \approx 50$ . Это означает, что в задержанном полукадре яркость изображения разряда передана с ослаблением в 5 раз.



**Рис. 7.** Зависимость диаметра  $D$  насыщенного «чехла» и интеграла  $E_{2max} \cdot dx$  от высоты « $h$ ».

по пику яркости канала, от высоты « $h$ » участка молнии над землей (здесь  $dx$  – текущий диаметр канала на уровне  $E_{2max}/2$ ). Наличие явной корреляции между  $D$  и  $E_{2max} \cdot dx$  позволяет заключить, что свечение вокруг канала молнии вызвано в основном рассеянием света, излученного каналом, во влажном воздухе. Возможно, это «паразитное» свечение может скрывать реальные разрядные процессы в объеме вокруг канала. Благодаря режиму работы ТВК с задержанными полукадрами удалось зафиксировать как слабосветящиеся, так и очень яркие структуры молнии. При усилении  $\sim 10^4$  раз, длительности кадра  $\sim 10$  мкс, расстоянии до разряда  $\sim 500$  м ЭОК К004М перекрывает более чем стократный перепад яркости разряда молнии при разрешении  $\sim 0,5$  м.

Обработка изображения варьированием его

яркостью и контрастностью (рис. 8 и 9), а затем и реконструкция (рис. 10) позволили выявить тонкую пространственную структуру разряда.

При этом строки с насыщенной яркостью были удалены, а на их место были помещены фрагменты изображения канала лидера с соответствующих соседних ненасыщенных строк с последующим номером. Изображения крупных ответвлений влево на высоте между 8 и 15 м, а также мелких слабых веточек, густо обвивающих канал лидера вдоль его длины, были восстановлены суммированием изображений, полученных при различных сочетаниях указанных выше варьируемых параметров, при которых разные фрагменты крупных ответвлений и особенно мелких веточек проявлялись наиболее контрастно. При этом на место удаленных насыщенных строк методом пространственного интерполирования помещались указанные фрагменты с яркостью, равной полусумме яркостей фрагментов предшествующей и последующей ненасыщенной строки.

Сам лидер в экспозицию не попал, но созданные им крупные яркие ветви и мелкие слабые веточки были «оживлены» током обратного разряда и поэтому во время экспозиции излучают свет. По крутым изгибам канала и крупным его ответвлениям можно выделить ступени лидера. Начала ответвлений совпадают с концом ступеней. На рис. 6, 8-10 отчетливо видны крупные и средние ветви на концах ступеней. Вероятно, механизм ветвления и механизм ступеней взаимосвязаны. Последнее крупное ответвление от нисходящего канала лежит на уровне  $\sim 8$  м от земли (рис. 10), а едва заметная мелкая веточка ещё на  $\sim 3$  м ниже. Это означает, что место встречи каналов нисходящего и встречного лидеров, если последний существовал, находится ниже 5-8 м.

Впервые обнаружены слабые короткие (длиной от 1 до 3 м) веточки вокруг основного канала, направленные не только вниз по направлению лидера молнии, но и в противоположном

направлении, то есть вверх. Возможно, это следы короны обратного разряда, нейтрализующей объемный заряд лидера.



**Рис. 8.** Рис. 5а, яркость которого увеличена с 50% до 63%, контраст увеличен с 50% до 90%.



**Рис. 9.** Негатив части канала на рис.8.



**Рис. 10.** Изображение рис. 9 после его реконструкции.

Изображения трех разрядов (рис. 5б-г), полученных в дневную грозу 1 августа 2005г., в основном похожи на разряд на рис. 5а, однако они существенно менее информативны (все изображения насыщены), поскольку были получены в обычном режиме работы ТВК, то есть без задержки записи второго полукадра.

#### Заключение

Приведенные здесь результаты экспериментов подтверждают большие принципиальные возможности ЭОК, но при этом свидетельствуют о том, что высокоскоростная регистрация молний с их помощью является гораздо более сложной задачей по сравнению с регистрацией импульсных разрядов в длинных воздушных промежутках. Особенно трудным является вопрос синхронизации момента срабатывания камеры с лидерной стадией молнии. В большинстве случаев чувствительность первого канала ФД, оставшаяся той же, что была при проведении экспериментов [2, 3], оказалась не вполне достаточной для надёжной его работы при расстоянии 475 м до молнии. Это расстояние было в 5 с лишним раз больше чем расстояние до разрядного промежутка при испытаниях камер в [2, 3]. Из-за этого в случае молнии интенсивность светового сигнала на входе первого канала ФД без учёта существенного ослабления сигнала в водяных парах и каплях дождя была по крайней мере в 25 раз меньше чем в [2, 3].

В [2, 3] ГИН 6 МВ работал сериями с интервалом между разрядами около 2 минут. Тогда в течение недели было произведено более 1500 разрядов, большая часть которых использовалась для настройки ФД и ЭОК. Подобного количества удачных разрядов за грозовую сезон невозможно иметь ни при триггерных, ни, тем более, при естественных молниях. Удачным в случае триггерной молнии можно считать тот разряд, когда, во-первых, удалось синхронизироваться с нужной стадией разряда, во-вторых, когда яркость разряда соответствовала установленному коэффициенту усиления яркости, в результате чего зарегистрированное изображение оказалось внутри линейного динамического диапазона ЭОК. В случае естественной молнии она при всём при том должна ещё и попасть в поле зрения ЭОК, что бывает весьма редко. Поэтому набор необходимого статистического материала по регистрации молнии гораздо более трудоёмок и требует несоизмеримо большего времени.

Что касается возможности регистрации обратного разряда с необходимым временным разрешением, когда полное время многокадровой или линейной развёртки будет составлять соответственно единицы или доли микросекунды, то она представляется

вполне реальной и при существующей чувствительности фотодатчика ФД. Надёжная же синхронизация ЭОК с лидерной стадией молнии требует существенного повышения чувствительности ФД, что может быть достигнуто простым увеличением напряжения питания ФЭУ.

Если в случае триггерных молний расстояние от ЭОК до молнии точно известно, то в случае естественных – нет. Для измерения расстояния до естественных молний следует использовать таймер с вычислительным устройством, запускаемый импульсом 2-го канала ФД от излучения обратного разряда и останавливаемый в момент прихода звуковой волны к микрофонному датчику в месте установки ЭОК. Временной интервал, измеренный таймером, позволит вычислительному устройству выдать в цифровом виде значение дальности до молнии. Тогда можно будет легко вычислить масштаб фотографирования и определить истинные размеры всей молнии или любого её фрагмента. Такой многофункциональный блок управления программой съёмки CUSP-01 (CONTROL UNIT FOR SHOOTING PROGRAM), предназначенный для управления моментом запуска до 8-ми любых электронно-оптических камер с регулируемой задержкой запуска между каждой из них от 0,1 до 500 мкс (можно и более), для выдачи сигнала на сброс усиления яркости, а также для измерения расстояния до молнии (или любого процесса, сопровождающегося импульсной вспышкой и звуковым импульсом) нами разработан [6].

Кроме того, если полярность триггерной молнии точно известна (знак и величина напряжённости поля перед пуском ракеты контролируются датчиком), то для того, чтобы сравнивать закономерности развития триггерной и естественной молний, нужно регистрировать и полярность естественных молний.

#### Литература

1. Wang D. et al. Attachment process in rocket-triggered lightning strokes // Journ. Geoph. Res, 1999, V.104, №D2. P. 2143-2150.
2. Горин Б.Н., Карнов М.А. и др. Разработка и испытание электронно-оптических камер с усилением яркости для исследования молнии и длинной искры // Сборник научных трудов Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству, Владимир, Россия, 2003, т. 1, С. 263-269.
3. Lebedev V.B., Feldman G.G. et al. Features of Application of Image Converter Cameras for Research on Lightning and Discharges in Long Air Gaps // SPIE, V. 5580, P. 887-897, 2005.
4. Lebedev V.B., Feldman G.G. et al. Test of K004M and K008 Russian image converter cameras when recording triggered lightning in Florida // SPIE V. 6279 (SPIE, Bellingham, WA, 2007) 62790D.
5. Lebedev V.B., Feldman G.G. et al. Test of K004M Russian image converter camera when recording natural lightning in Florida // там же, где и [4], 62792D.
6. CUSP-01 (CONTROL UNIT FOR SHOOTING PROGRAM), <http://www.bifocompany.com>