

## Испытание российских электронно-оптических камер К004М и К008 при регистрации триггерных и естественных молний во Флориде

В.Б. Лебедев<sup>а</sup>, Г.Г. Фельдман<sup>а</sup>, Б.Н. Горин<sup>а</sup>,  
В.А. Раков<sup>б</sup>, М.А. Юман<sup>б</sup>, Р.К. Олсен<sup>б</sup>

<sup>а</sup> ВНИИОФИ, Компания БИФО; <sup>б</sup> Университет Флориды (США)

*Приводится краткое описание испытательного оборудования и аппаратуры для регистрации пространственно-временных параметров молнии на Международном полигоне по изучению молнии в Кэмп Блэндинге (США, штат Флорида), принадлежащем Университету Флориды, а также результаты демонстрации и первые результаты испытания российских электронно-оптических камер.*

**Ключевые слова:** *электронно-оптическая камера, электрический разряд, молния, яркость.*

*A short review of testing equipment and apparatus for recording of lightning spatial-temporal parameters at the International Center for Lightning Research and Testing at Camp Blanding (USA, state of Florida) which belongs to the University of Florida, as well as results of demonstration and first results of Russian image converter cameras testing are presented.*

**Key words:** *image converter camera, electric discharge, lightning, brightness.*

### Введение

Главное достоинство триггерной (инициируемых искусственно) молнии состоит в том, что точно известно место, в которое она ударит. Это позволяет фотографировать с высоким пространственным и с необходимым временным разрешением процесс подхода молнии к поражаемому ею объекту, что практически невозможно сделать в случае естественной молнии. В свою очередь это позволяет изучать закономерности развития разряда молнии и в большей мере осознанно и научно обоснованно решать задачи грономолниезащиты разнообразных и прежде всего жизненно важных объектов. К таким объектам относятся мощные высоковольтные линии электропередачи и их подстанции, ядерные и другие электростанции, склады ядерных, химических и иных боеприпасов, нефтехранилища, наземные и морские нефтедобывающие установки и комплексы, другие гражданские и

военные объекты государственной важности, летательные воздушные и космические аппараты, плавучие средства и многое-многое другое.

Убытки, наносимые молниями во всём мире, колоссальны, порой невосполнимы и исчисляются астрономическими суммами. Свежий пример: среди нескольких равнозначных версий о причине выхода из строя энергетической сети восточного побережья США и Канады 14 августа 2003г была и молния. Тогда в этих обесточенных районах создалось чрезвычайно тяжёлое положение. Так что, происшедшее, возможно по вине молнии, нельзя назвать иначе как техногенной катастрофой. На восстановление быстро развалившейся энергетической сети потребовалось в разных районах от одной до нескольких недель. Поэтому изучение природы молнии, исследование её закономерностей и создание эффективных средств молниезащиты всегда было и остаётся актуальной необходимостью.

### **1. Полигон в Кэмп Блэндинге**

Полигон в Кэмп Блэндинге – единственный в мире научный центр, где молнию инициируют искусственно на регулярной основе. Инициирование (triggering) молнии осуществляется с помощью небольшой ракеты (рис.1.1), запускаемой вертикально вверх со стационарной (рис.1.2) или передвижной (рис.1.3) пусковой установки.



Рис.1.1. Ракета длиной около 1м с катушкой провода на хвосте, используемая для инициирования молнии



Рис.1.2. Стационарная 12-ти канальная пусковая установка в виде башни (высота верхней площадки башни над землёй составляет 11м)



Рис.1.3. Передвижная 6-канальная пусковая установка

К хвостовому оперению ракеты прикреплена катушка с тонким проводом длиной около 700м. Наружный конец провода соединён с землёй, то есть заземлён. Во время грозы, в те моменты, когда напряжённость электрического поля становится предкритической, равной не менее  $4\text{кВ/м}$ , производится пуск ракеты. Когда через 1,5-2 секунды ракета достигает высоты  $\sim 200\text{-}300\text{м}$ , с неё развивается восходящий разряд, сжигающий провод. После его взрывообразного сгорания электрическая связь с землёй

сохраняется посредством образовавшегося при взрыве провода плазменного канала и восходящий разряд продолжается. После его завершения в течение 1-2 секунд могут произойти до двух десятков разрядов, называемых компонентами триггерной молнии (рис.1.4), в результате последовательного подтекания электрических зарядов из других мест облака или соседних облаков в то место облака, из которого был инициирован первый разряд.



Рис.1.4. Серия из 11-ти компонентов триггерной молнии, инициированная ракетой, запущенной со стационарной пусковой установки (видимая по вертикали длина канала ~60м)

Фотография, приведённая на рис.1.4, была сделана обычным фотоаппаратом с выдержкой в несколько секунд. Прямой вертикальный канал слева – это след от взорвавшегося провода. Провод сгорает и замещается плазменным каналом в течение первых 10мс. Хорошо видно, что ветром, который практически всегда бывает во время грозы (в данном случае он дул слева направо) продукты горения провода (первый канал молнии) снесло вправо. Следующий разряд происходит в среднем через 0,3с, включая бестоковую стадию. Именно благодаря ветру, на рис.1.4 получилась пространственно-временная слева направо развёртка серии разрядов триггерной молнии. Несмотря на то, что канал постоянно сносило вправо, все разряды нашли цель и попали в башню (видно, как каналы более поздних разрядов при подходе к башне сильно изгибались влево).

Эти последующие после сгорания провода и завершения восходящего разряда компоненты во многом по физике их развития похожи на компоненты естественной молнии. Именно эти последующие разряды обычно и являются главным предметом исследования.

Башня стационарной пусковой установки выполнена полностью из дерева, то есть из изолятора. Блок из 12 металлических пусковых труб, в которых установлены ракеты, соединяется с землёй тонким проводом, который так же, как и провод ракеты, сгорает в начальной стадии триггерной молнии. Последующие разряды принимает на себя одна из трёх, соединённых между собой металлических труб диаметром 25мм, расположенных горизонтально выше пусковых труб на ~ 3м между 4-мя шестиметровыми вертикальными пластмассовыми мачтами (см. рис.1.2). Эти токоприёмные трубы соединены шиной с низкоомным шунтом, сигналы с которого записываются цифровыми осциллографами. Расшифровка осциллограмм позволяет знать оценить электрические параметры прошедшей серии разрядов. Замена сгоревшего провода, заземлявшего блок пусковых труб в начальной стадии, производится автоматически. Так что следующий пуск ракеты может быть произведен через 2-3 минуты после предыдущего, если напряжённость поля возрастает за это время до нужного уровня. Управление пусковой установкой осуществляется из пультового помещения, удалённого от башни на ~50м, посредством пневматики (через пластиковые шланги). Для передачи сигналов от датчиков к осциллографам используются волоконно-оптические линии связи. Таким образом, пультовое помещение электрически изолировано от пусковой установки.

Вероятность инициирования молнии ракетой составляет в среднем 60%. В течение удачного грозового сезона, который длится с мая по август включительно, число пусков ракет, приводящих к инициированию молний, составляет обычно не менее 40.

С помощью передвижной, установленной на автомобиле (рис.1.3), пусковой установки триггерную молнию можно направить на тот объект, молниезащиту которого необходимо разработать или испытать эффективность уже существующей защиты, разработанной до появления метода триггерных молний. Обычно это частичный или полноразмерный и в той или иной мере действующий макет этого объекта.

Для исследования электромагнитной обстановки вблизи канала молнии, не искажённой пусковой установкой, на полигоне имеется подземная пусковая установка, расположенная на участке земли с выкорчеванной и вытравленной растительностью (рис.1.5 и 1.6).



Рис.1.5. Подземная пусковая установка



Рис.1.6. Серия разрядов триггерной молнии, инициированная ракетой, запущенной из подземной пусковой установки

На рис.1.6 видно, как два разряда пришли в стоящую справа стойку высотой 1,9м с пьезодатчиком.

На рис.1.7 виден отрезок взлётно-посадочной полосы со светосигнальными лампами по обе стороны вдоль неё.

Кабель электропитания, защищённый тросом и стержневыми заземлителями расположен под землёй. Молния «хорошо» поражает подземные объекты (кабели, трубопроводы и т.п.) в сухом грунте и вечной мерзлоте. Рядом со взлётно-посадочной полосой построены два полноразмерных фрагмента местных трёхпроводных линий электропередачи длиной около 600м. Провода одной линии расположены в горизонтальной плоскости (без учёта провисания), другой – в вертикальной.



Рис.1.7. Фрагменты взлётно-посадочной полосы и двух линий электропередачи

На рис.1.8 показана установка, использовавшаяся для испытаний молниестойчивости детонаторов боеприпасов, в том числе и ядерных.



Рис.1.8. Установка для испытаний молниестойчивости детонаторов боеприпасов

При этом удар молнии приходился точно в детонатор. Нужно отметить, что все испытанные детонаторы оказались молниестойчивыми и ни один из них не сработал.

Фотографирование молний, инициированных ракетами, запускаемыми с пусковой башни, обычно производится из лабораторного помещения, расположенного в 430м от башни (рис.1.9).



Рис.1.9. Вид с башни на лабораторное помещение (вверху в центре фото на опушке леса)

Справа внизу рядом с башней виден test house – дом, используемый для испытания устройств молниезащиты различного рода построек, в том числе, жилых зданий.

Грозовая обстановка над США контролируется национальной системой обнаружения молний (NLDN). Для передачи информации используются искусственные спутники Земли. Грозовая обстановка над Флоридой и, в частности, вокруг полигона отображается на дисплее компьютера (рис.1.10) с периодичностью в несколько секунд.

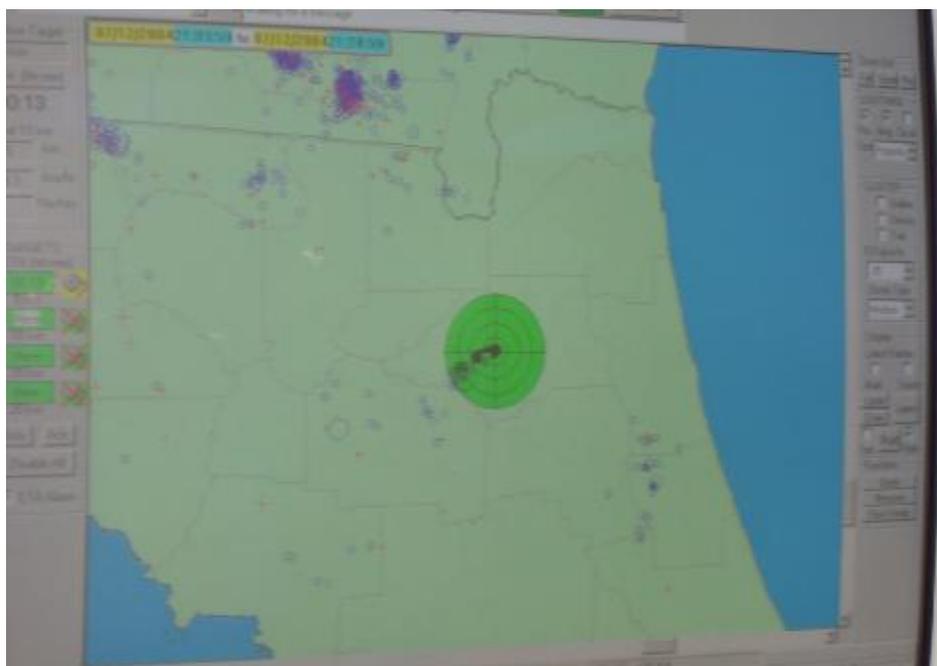


Рис.1.10. Фрагмент текущей грозовой обстановки над Флоридой

Синим цветом помечаются места, где произошли отрицательные молнии, красным – положительные. Анализ накопленной в течение интересующего отрезка времени информации позволяет контролировать размеры грозовой зоны, направление и скорость её движения. Чёрная жирная точка в центре рис.1.10 – это полигон в Кэмп Блэндинге, а четыре окружности вокруг полигона с радиусами 5, 10, 15 и 20км – это те зоны, при подходе грозы к которым объявляется та или иная степень готовности к пуску ракеты. Слева внизу – это часть Мексиканского залива, справа – Атлантический океан.

## 2. Регистрация триггерных молний

Постоянная аппаратура, используемая на полигоне для регистрации пространственно-временных параметров молний, представлена высокоскоростными оптико-механическими камерами американской компании CORDIN, цифровыми фото- и видеокамерами, а также четырёхканальным фотодатчиком, каналы которого нацелены на разную высоту. По осциллограммам сигналов фотодатчика можно определять направление распространения свечения (вверх или вниз), его среднюю скорость на 3-х участках и относительную яркость свечения на контролируемых высотах.

Часто используется другая регистрирующая аппаратура. Сам факт её использования и испытаний на этом уникальном полигоне и, тем более, положительный отзыв Университета Флориды являются весьма престижным моментом для создателей этой аппаратуры.

Летом 2004г было проведено опробование регистрации триггерных молний одновременно двумя камерами – камерой K004M /1,2/, приобретённой Университетом Флориды специально для этих целей, и камерой K008 /3/. Камера K004M (размеры фотокатода ЭОП  $8 \times 8 \text{мм}^2$ ) может работать в режиме линейной развёртки длительностью от 0,355мкс до 10,65мс и покадровой съёмки (от 2 до 9 кадров, длительность кадров от 0,1 до 10мкс, длительность пауз от 0,5 до 999,9мкс) со снижаемым скачком в процессе регистрации усилением яркости. Камера K008 (размеры фотокатода  $15 \times 20 \text{мм}^2$ ) может работать в режиме линейной развёртки длительностью от 2нс до 600мкс и в однокадровом режиме (длительность кадра от 10нс до 600мкс). Основные параметры этих камер приведены в /1,2, 4/.

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 же изображения электрического пробоя в длинных воздушных промежутках подвержена по мере его развития очень сильной флуктуации. Поэтому при покадровой регистрации короткие вспышки в течение стримерно-лидерной стадии могут попадать в межкадровые интервалы (паузы). 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 накладываться и пространственная информация окажется либо потерянной, либо искажённой. При одновременной регистрации двумя камерами, одна из которых работает в режиме многокадровой, а другая в режиме линейной

развёртки, полученные данные 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, могут быть получены точная информация о форме канала и соответственно достоверные данные о скорости распространения свечения.

Камера К004М в комплекте с фотодатчиком ФД001, камера К008 и разработанное американской стороной устройство блокировки камер от преждевременного и повторного запуска были установлены на платформе штатива (рис.2.1).



Рис.2.1. Камера К004М на нижней платформе штатива, камера К008, фотодатчик ФД001 и устройство блокировки на верхней платформе

После взрыва провода ракеты через образовавшийся ионизированный канал в течение нескольких десятков-сотен миллисекунд протекает относительно небольшой (сотни ампер), флуктуирующий по величине ток. Фотодатчик ФД001 настраивают так, чтобы его пусковой (первый) канал срабатывал при взрыве провода. Однако устройство блокировки в исходном состоянии держит выход этого канала запертым. После взрыва провода оно отпирает канал через время, несколько меньшее чем среднестатистическая задержка следующего после взрыва провода разряда, составляющая ~300мс. Это исключает возможность случайного запуска камер до следующего после взрыва провода разряда. При следующем разряде, который должен быть зарегистрирован камерами, после пропускания импульса фотодатчика на запуск камер устройство снова запирает этот канал на 10 секунд. При этом оно перестаёт реагировать на импульсы фотодатчика от возможных в течение 1-2 секунд новых разрядов и, таким образом, предотвращает возможность наложения изображения нескольких развёрток на один кадр считывающей ПЗС телекамеры (время считывания и последующей записи в компьютер составляет 0,5-1с). Второй канал фотодатчика, чувствительность которого заглублена светофильтрами, должен срабатывать только от очень яркой стадии разряда – дуговой, начинающейся с так называемого возвратного удара. Поскольку яркость возвратного удара на несколько порядков выше яркости лидера, это может привести не только к насыщению зарегистрированного изображения возвратного удара (исчезновению градаций яркости), но и к потере изображения лидера на предшествующем участке развёртки. По импульсу этого канала в камере К004М в процессе развёртки скачком происходит снижение (сброс) коэффициента усиления яркости. Степень сброса может плавно регулироваться от нуля вплоть до полного запираания ЭОП.

При испытании камер необходимо было получить с высоким пространственным и временным разрешением картины развития стримерно-лидерной стадии (фазы) разряда молнии на участке высотой ~ 50-100м над пусковой башней при подходе канала нисходящего лидера молнии к поражаемому объекту и последующей дуговой, так называемой сквозной фазы, а также измерить скорость распространения свечения возвратного удара. Поражаемым объектом в данном случае были указанные выше три соединённые между собой и заземлённые через токоизмерительный шунт

металлические трубы, расположенные между 4-мя вертикальными пластмассовыми мачтами на высоте 3м над блоком из 12-ти пусковых труб, установленным в центре верхней площадки башни (см рис.1.2 и 2.2).



Рис.2.2. Вид на башню с места установки камер К004М, К008 и фотодатчика ФД001

Согласно оценке скорости распространения свечения возвратного удара, полученной здесь в 1997г /5/ при испытании японского высокоскоростного (до  $\sim 10^7$  кадр/с) матричного регистратора ALPS (16x16 ПИН-фотодиодов), она сопоставима со скоростью света. Но высококачественного изображения с помощью указанного ALPS принципиально нельзя было получить из-за малого количества ПИН-фотодиодов в матрице. Пространственное разрешение камер К004М и К008 на фотокатоде ЭОП, составляет не менее 10п.л./мм. Это по количеству разрешаемых в рабочем поле фотокатода элементов соответственно в 25 и  $\sim 150$  раз больше чем у ALPS /2,4/.

Возможность регистрации в ультрафиолетовом диапазоне является также существенным преимуществом К004М перед ALPS. Поэтому, помимо регистрации в видимом свете, предполагалось камерой К004М провести регистрацию в ультрафиолетовом диапазоне, а камерой К008 в жёстком рентгене с помощью свинцовой обскуры, проецирующей рентгеновское изображение на малоинерционный (0,1мкс) люминофор-конвертор, нанесённый на волоконную шайбу, сочленённую с волоконной шайбой фотокатода ЭОП.

В грозном сезоне 2003 года рентгеновское излучение триггерных молний уже было надёжно зафиксировано рентгеновскими датчиками (на основе кристалла натрий-йод, установленного на входе ФЭУ), помещёнными в дюралевые контейнеры (три у подножья пусковой башни, см. рис.2.3, и один на верхней площадке башни).



Рис.2.3. Контейнеры с рентгеновскими датчиками

Каждый контейнер содержит по 3 датчика, настроенных на разные спектральные диапазоны рентгеновского излучения. Каждый контейнер нацелен на определённую высоту над башней. Наиболее интенсивным оказалось излучение с энергией квантов в диапазоне 30-250кэВ. Теперь с помощью камеры К008 предстояло увидеть в однокадровом режиме регистрации как фрагменты, так и всё изображение канала нисходящего лидера молнии в жёстком рентгене, а в режиме линейной развёртки – непрерывную рентгеновскую динамику лидера.

Предполагалось, что наиболее трудной задачей при регистрации триггерной молнии окажется обеспечение синхронизации камер, то есть запуск их с помощью фотодатчика ФД001 с необходимым упреждением, учитывающим “мёртвое время” камер. Для этого первый (запускающий) канал фотодатчика с помощью перемещения его входной линзы по вертикали наводился на высоту ~ 70м над мачтами башни. Щель, установленная в его оптической системе, позволяла “видеть” ему на этой высоте горизонтальную зону высотой 15м и шириной 150м. Лидер, пересекая эту зону, должен был запустить фотодатчик, а тот – камеры. При среднестатистической скорости лидера  $10^7$ м/с на прохождение дистанции 70м ему должно было

потребоваться 7мкс. Высота поля зрения камер К008 и К004М над мачтами составляла 80м и 40м соответственно. Тогда камера К008 при работе в однокадровом режиме с длительностью кадра 6мкс (“мёртвое время” камеры 0,2мкс) должна была бы зарегистрировать канал лидера, ещё недошедшего до мачт башни примерно на 10м. В камере К004М был установлен диапазон линейной развёртки 3мкс/см (при этом полная длительность развёртки составляла 10,65мкс). При “мёртвом времени” камеры 1,9мкс ожидалось, что изображением нисходящего лидера на развёртке будет занято около 4мкс. Далее в начале дуговой стадии возвратного удара должен был сработать 2-й канал фотодатчика и скачком снизить высокое исходное усиление яркости К004М. Таким образом, без насыщения (чрезмерной экспозиции) должно быть зарегистрировано и изображение возвратного удара.

Конечно, из-за флуктуации скорости лидера от молнии к молнии длина его канала, зарегистрированная камерой К008, может меняться. По этой же причине на развёртке К004М могут меняться как местоположение изображения, так и его размеры вдоль оси времени. Но предполагалось, что последовательными уточнениями наводки фотодатчика на необходимую высоту, подбором длительности кадра К008 и длительности развёртки К004М, усиления яркости камер можно будет после регистрации нескольких молний получить высококачественные изображения процесса подхода лидера к башне.

Однако трудности, причём непреодолимые, оказались совсем не там, где их ожидали. Сюрприз преподнесла погода над полигоном. Она не дала никаких возможностей для каких бы то ни было последовательных приближений и уточнений. Грозы в окрестностях полигона громыхали едва ли не каждый день, а иногда и по несколько раз в день. При этом каждый раз объявлялась готовность к пуску ракеты и всей многочисленной регистрирующей аппаратуры. Но грозы, уже вплотную приблизившись к полигону, как назло, то останавливались, так и не дойдя до него, то вдруг обходили его стороной. Напряжённость поля над полигоном достигала предкритической величины, необходимой для пуска ракеты, всего лишь несколько раз. Сотрудники полигона по этому поводу с горечью шутили, говоря, что Кэмп Блэндинг в этом високосном году является «area of lightning protection» - зоной, защищённой от молнии...

Если в предшествующие годы за грозовой сезон (с мая по середину августа) производилось 50-70 пусков ракет, то за сезон 2004 года было сделано всего 8 пусков. Из них 5 инициировали молнию. При этом в присутствии разработчика камер К004М, К008 и фотодатчика ФД001 В.Б. Лебедева с 6 июля по 6 августа было сделано 3 пуска в середине указанного срока. Из них 2 инициировали молнию. Но в первом случае за начальной стадией (взрывом провода ракеты) ни одного последующего разряда не произошло. Поэтому камеры и не запустились. Во втором случае скорость лидера, видимо, оказалась больше чем  $10^7$  м/с. В результате камера К008 зарегистрировала канал лидера не на подходе к башне, а уже достигшего её с наложенным на него более ярким каналом возвратного удара (рис.2.4).

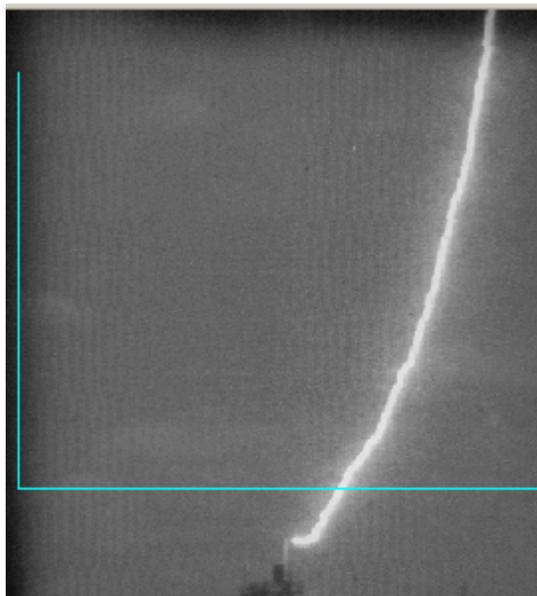


Рис.2.4. Триггерная молния, зарегистрированная камерой К008 (длительность кадра бмкс, видимая по вертикали длина канала ~ 80м)

Камера же К004М, хоть и сработала, но то, что она зарегистрировала, записать в компьютер не удалось, так как буквально за несколько секунд до пуска ракеты он завис.

На самом деле камера К008 зарегистрировала только изображение канала разряда и ближайшей к нему мачты, освещённой разрядом. Этот снимок был наложен на ранее записанное изображение башни, в результате чего и получилась композиция, представленная на рис.2.4.

Если бы только можно было предполагать, что на этом и закончатся эксперименты в сезоне 2004 года, то при флуктуации скорости нисходящего лидера в 2 раза относительно среднестатистической, конечно же, для надёжной регистрации нужно было установить значительно меньшую длительность кадра камеры К008, то есть 2мкс, вместо 6мкс. Тогда, наверняка, мы получили бы картину, чем-то похожую на одну из картин рис.2.5 /2/, когда стримеры лидера, как щупальца осьминога, ищут для лидерного канала наиболее лёгкий (слабый в смысле электрической прочности) путь к цели.

**-2,2МВ**

**130 / 7500мкс**

**К008**

F = 300 мм; Фильтр  $\lambda=413$  нм. Однокадровый режим. *l* - ступень лидера.

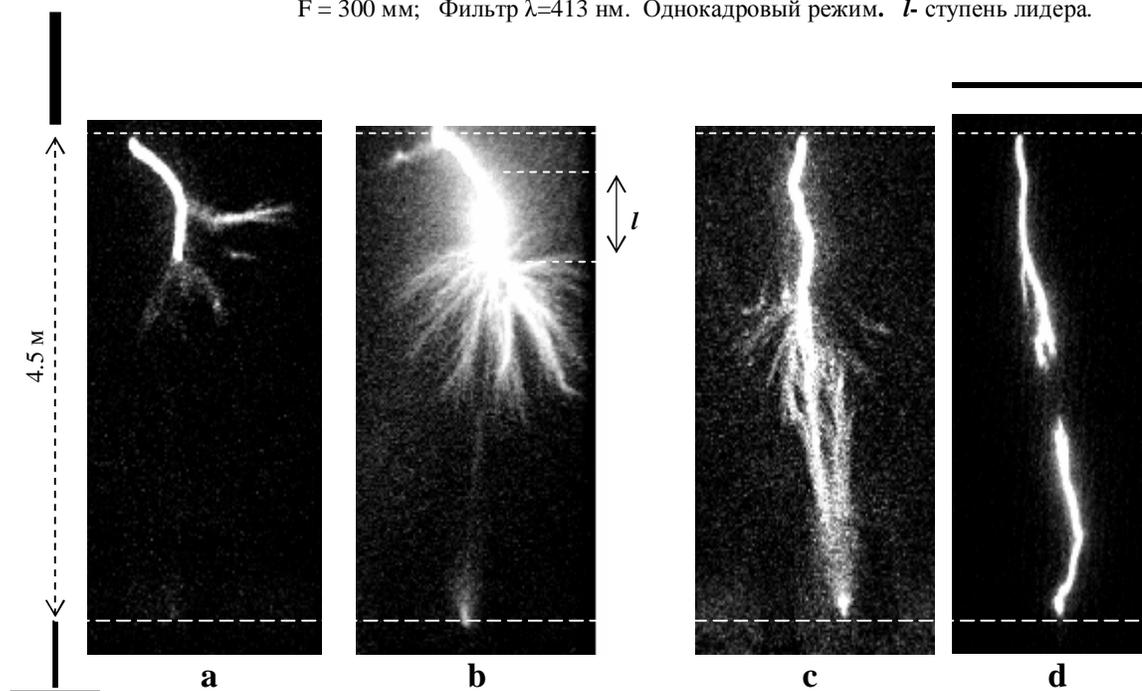


Рис.2.5. Картины развития стримерно-лидерной стадии отрицательного разряда в воздушном промежутке типа «стержень – стержень на плоскости» (длина промежутка 4,5м, амплитуда импульса 2,2МВ), полученные при испытании камеры К008 в июле 2002г во ВНИЦ ВЭИ (г. Истра) в однокадровом (2мкс) режиме при последовательном увеличении задержки запуска камеры от кадра **a** к кадру **d**.



остальную часть этого провода. Ширина средней тёмной зоны (над этими полосами) равна расстоянию от верхнего конца блока пусковых труб на рис.2.6а до устройства автоматического заземления, от которого тонкий провод далее спускается к земле. Над средней тёмной зоной до верха снимка видно свечение отдельных каналов, замещающих провод ракеты. Даже в течение такой короткой развёртки заметно нарастание яркости и ширины светящихся полос в зоне развёртки, занятой проводом ракеты. Далее, судя по рис.1.4 и 1.6, отдельные светящиеся полосы должны слиться между собой. Чуть правее середины развёртки виден небольшой очень короткий всплеск яркости свечения каналов, замещающих провод ракеты и провод заземления, как стоп-кадр визуализировавший пространственное положение этих каналов, видимо, под действием всплеска разрядного тока.

На втором снимке (рис.2.7) ясно видно наложение четырёх развёрток на один кадр ПЗС телекамеры. Тогда устройство блокировки от преждевременного и повторного пуска камер ещё не было введено в действие. Казалось бы, из-за наложения информация полностью потеряна. Однако это не так. Вот, какие выводы и предположения можно сделать, тщательно анализируя этот снимок.

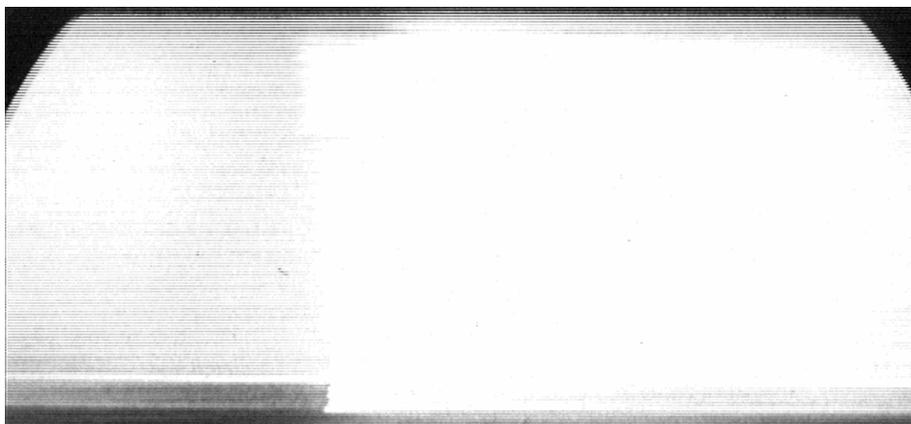


Рис.2.7. Наложение четырёх развёрток длительностью 10,65мкс на один кадр телекамеры.

Яркость в зоне наложения изображений (правее первой трети длины развёртки) достигает насыщения. Трассы развёрток последовательно немного сдвинуты вниз одна относительно другой. Это хорошо видно как по верху, так и особенно по низу их трасс. Все изображения занимают полную высоту поля своей развёртки.

На первой (верхней) развёртке изображение занимает всю её длину. На второй, что чуть ниже, симметрично середине развёртки в самом её верху виден всплеск яркости, занимающий  $\sim 1/6$  часть длины развёртки. Первую картину можно интерпретировать как установившуюся стадию дуги (возвратного удара), начавшуюся за левым краем развёртки. То же можно сказать и о второй развёртке. Всплеск яркости на ней мог быть связан с прохождением через канал дуги небольшой дополнительной порции заряда. Нечто похожее мы обнаружили на развёртке свечения взорвавшегося провода (см. рис.2.6 "б" и комментарии к нему).

Равномерное во времени свечение на всей длине первой развёртки и равномерное, видимо, слабое до скачка яркости свечение на второй развёртке наталкивают на мысль о том, что обе эти развёртки могли произойти в течение дуговой стадии одного и того же разряда. Если яркость дуги в процессе горения пульсировала под действием дополнительных порций протекавших зарядов, что вполне вероятно, то фотодатчик реагировал на всплески яркости и запускал камеру.

На третьей развёртке (часть её изображения - это серая узкая полоса внизу снимка) видно сравнительно равномерное свечение дуги в первой и третьей трети длины развёртки.

На четвертой развёртке (самой нижней) изображение начинается в конце её первой трети в виде резкого скачка яркости с косым несколько изломанным профилем. Его свечение длится почти до самого конца развёртки. Чуть правее середины развёртки изображение из-за большого входного сигнала начинает понемногу равномерно сжиматься по вертикали. Благодаря этому, оказались видны равномерные свечения дуги на первой развёртке (в правой верхней части снимка) и на третьей развёртке (в правой нижней части снимка). Судя по нижнему краю изображения четвертой развёртки, свечения до скачка яркости не было или оно настолько слабое, что его не видно. Поэтому резкий скачок – это либо начало дуги следующего разряда молнии, либо, что вероятнее всего, очередной всплеск в течение одного и того же разряда, только в самом его конце, когда разряд почти погас. Таким образом, не исключено, что все четыре развёртки могли произойти в течение одного разряда. Изломанный профиль фронта скачка – это форма канала возвратного удара

То факт, что фронт скачка вполне различим, свидетельствует о том, что, во-первых, значительной перегрузки фотокатода входным сигналом не было (это хорошо), а, во-вторых, исходное усиление яркости было небольшим, во всяком случае, не достаточным для уверенной регистрации стримерно-лидерной стадии. Если бы оно было достаточным, то при отсутствии сброса усиления яркости в дуговой стадии разряда многократно перенасыщенное изображение этой стадии “залило” бы ярким светом весь экран ЭОП.

То, что трассы развёрток немного сдвинуты вниз по вертикали одна относительно другой, означает, что временной интервал между развёртками был весьма небольшим (в среднем около 13мс), так как длительность кадра ПЗС телекамеры составляет 40мс. Из-за этого разделительные конденсаторы генератора затворных импульсов не успевали полностью восстановить свой исходный заряд после каждого срабатывания и затворные пластины ЭОП (они отклоняют изображение по вертикали) каждый раз немного сдвигали трассу развёртки вниз. Яркая узкая полоса внизу каждой развёртки – это, видимо, свечение канала в месте касания им металлической трубы.

На рис.2.8 показан рис.2.7, обработанный таким образом, чтобы были выделены только самые яркие его фрагменты. Это отмеченные выше короткий всплеск яркости в середине второй развёртки (в самом верху снимка), всплеск яркости на четвёртой развёртке с резким несколько изломанным фронтом, отражающим форму канала, и свечение в месте касания им металлической трубы, видимое на 1-й, 3-й и 4-й развёртках.



Рис.2.8. Начало свечения канала возвратного удара, полученное контрастированием изображения рисунка 2.7 (длительность развёртки 10,65мкс).

Судя по очень резкому фронту свечения канала на рис.2.7 и 2.8, временное разрешение на этом диапазоне развёртки явно недостаточно для измерения скорости свечения возвратного удара. Поэтому длительность развёртки нужно будет уменьшать не менее чем на порядок.

На рис.2.9 показан 3-й снимок развёртки начала возвратного удара.

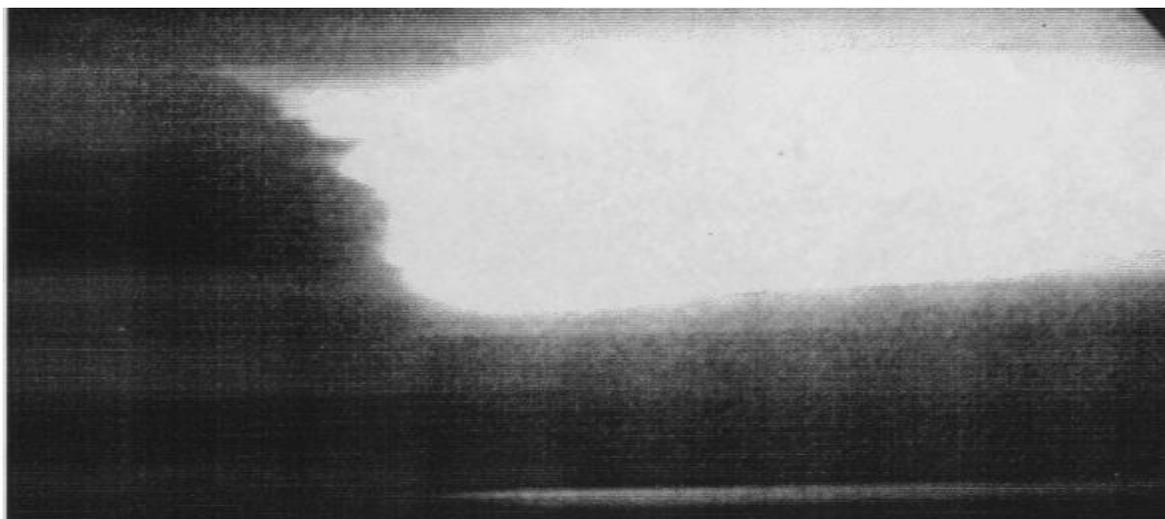


Рис.2.9. Камера К004М: развёртка (длительность 10,65мкс) начала возвратного удара.

Усиление яркости было относительно небольшим, поэтому свечения нисходящего лидера не видно. Запуск сброса усиления яркости был отключён. Яркость изображения насыщена. Перегрузка фотокатода входным сигналом есть, но небольшая (изображение немного сжалось по вертикали в начале обратного удара, а затем увеличилось – восстановилось). Форма изломанного фронта начала свечения отражает форму канала. Узкая светлая полоса внизу – это отблеск от перил верхней площадки башни.

На рис.2.10 показан 4-й снимок. При этом диафрагма входного объектива была полностью открыта, был подключён запуск сброса усиления яркости и установлена большая амплитуда сброса. Видно, что изображение (видимо, это лидер) сильно насыщено (из-за этого лидера не видно) и к концу развёртки начинает сжиматься из-за перегрузки фотокатода большим входным сигналом. В конце развёртки в начале дуговой стадии сработал сброс усиления яркости почти до нуля. В результате этого прорисовалась форма канала возвратного удара.

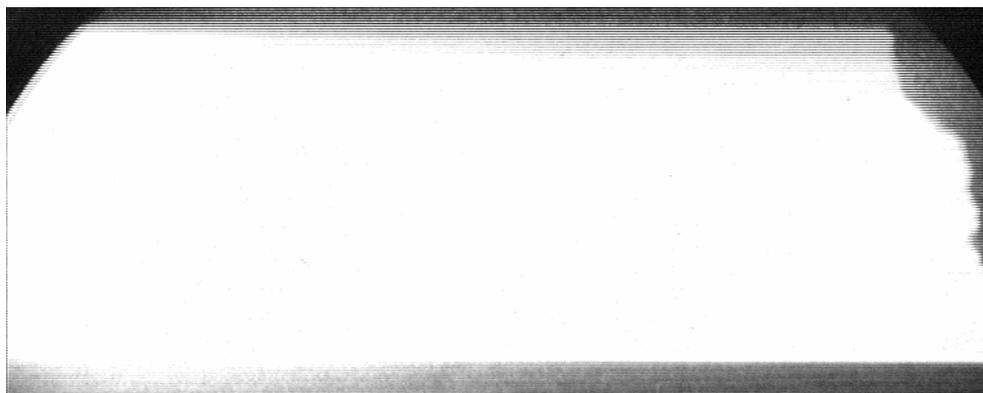


Рис.2.10. Сброс усиления яркости в конце развёртки (длительность развёртки 10,65мкс), где лидер перешёл в дугу.

### **3. Демонстрация камер в «Lightning Research Laboratory»**

25 сентября 2003г, когда грозовой сезон давно закончился, в «Lightning Research Laboratory» - лаборатории исследования молнии Университета Флориды в городе Гейнсвилл проходила демонстрация камеры K004M в действии для сотрудников, аспирантов и студентов. При этом объектом регистрации была искра в воздухе длиной ~30мм (рис.3.1) от электрошоковой дубинки. На всех снимках в первом (левом верхнем) кадре хорошо видны стримеры обеих полярностей, а также зарождающиеся у электродов и прорастающие в разрядный промежуток каналы лидеров. При нажатии рычага дубинки обычно следует серия многочисленных разрядов. Оказалось не простым делом научиться нажимать рычаг так, чтобы получался одиночный разряд. На правом верхнем снимке показана не вполне удачная попытка, когда произошло 2 разряда и из-за малого интервала между ними изображения 2-х развёрток попали в один кадр ПЗС телекамеры (кадр занимает 40мс).

Сброс усиления яркости при съёмке 2-х верхних снимков был отключён. При этом видно, что, начиная со второго кадра, когда произошёл пробой, изменение яркости разряда во времени имеет характер, похожий на колебательный.

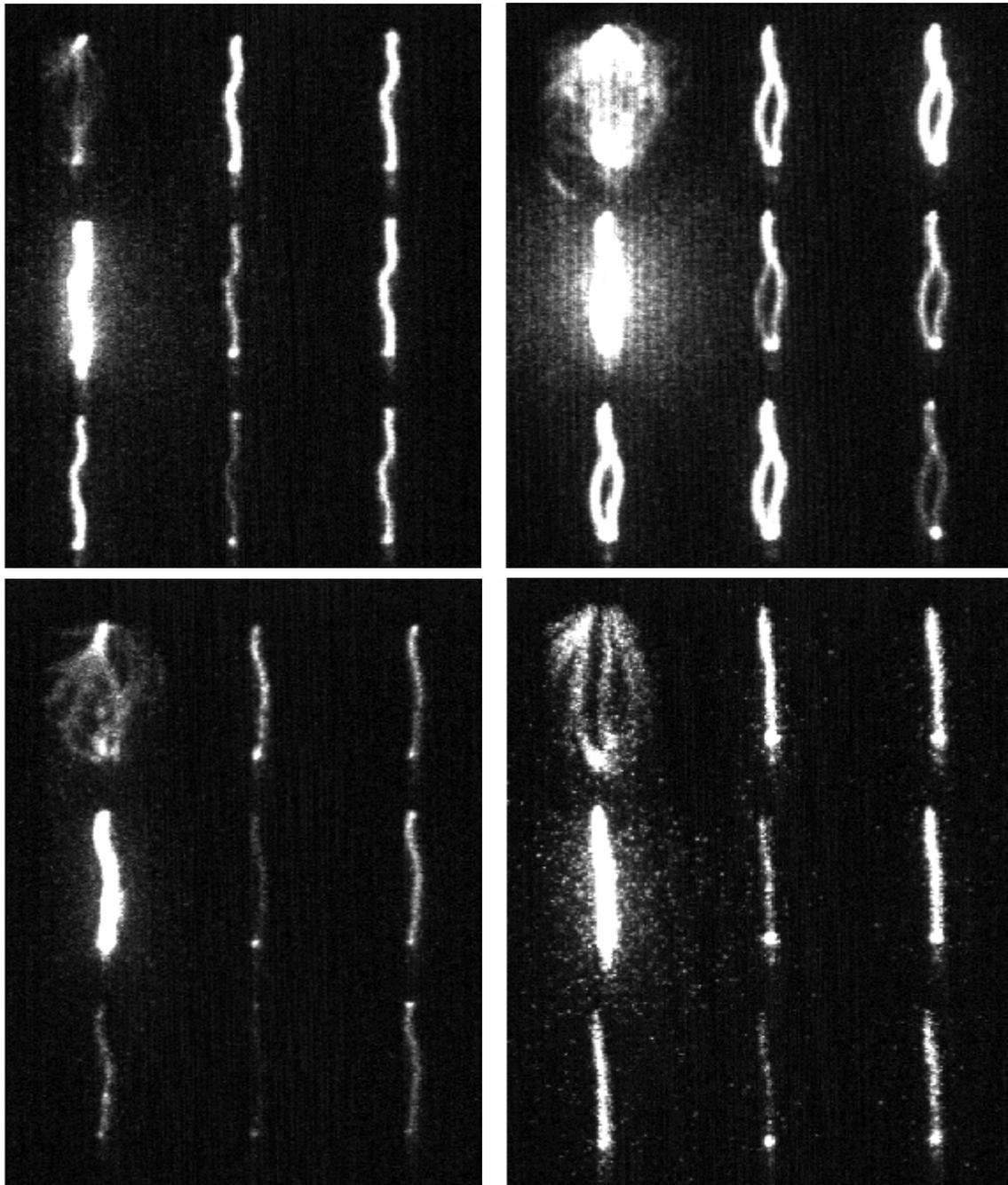


Рис.3.1. Камера К004М: 4 снимка 9-ти кадровой развёртки искры в воздухе длиной ~30мм (длительность кадров 0,1мкс, пауз - 0,5мкс; кадры в столбцах следуют сверху вниз, 1-й кадр вверху слева, 9-й кадр внизу справа).

При съёмке 2-х нижних снимков сброс усиления яркости происходил по сигналу фотодатчика в начале яркой стадии разряда во 2-м кадре. При этом видно, что 2-е кадры на этих снимках насыщены заметно меньше чем на верхних снимках, несмотря даже на то, усиление яркости на правом нижнем

снимке было существенно увеличено для того, чтобы в первом кадре получить более яркое изображение начальной стадии разряда. Так оно и получилось. Только из-за большого усиления яркости (режим работы ЭОП был близок к режиму счёта фотонов), когда яркость элементов изображения, состоящих всего из нескольких десятков фотонов, преобразованных в ЭОП в несколько электронов, уже почти достигает насыщения, структура изображения становится не непрерывной, а точечной. Но тут ничего не поделаешь, это – закон природы.

На рис.3.2 показаны 3 снимка линейной развёртки изображения той же искры длиной ~30мм без сброса усиления яркости. Причём усиление яркости от снимка к снимку увеличивалось. На 3-м снимке явно видна точечная структура изображения.

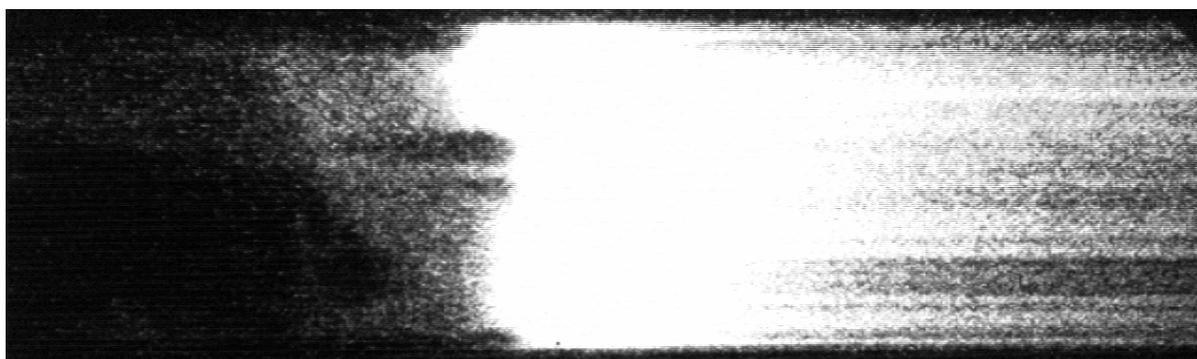
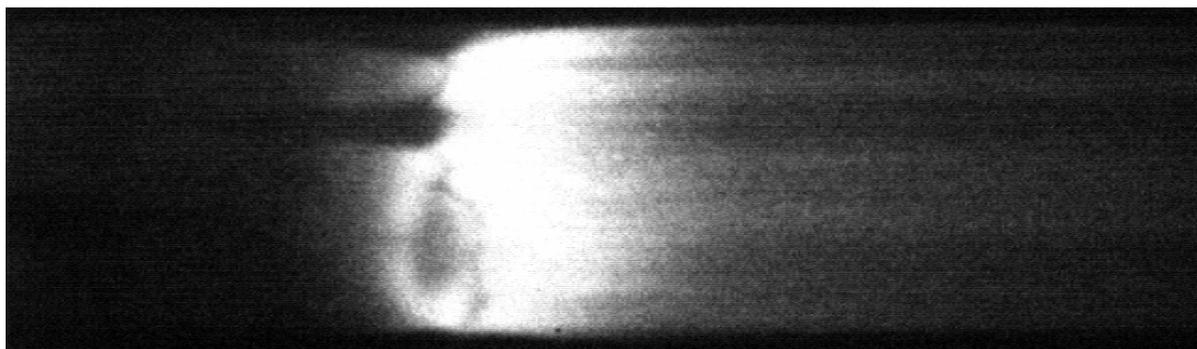
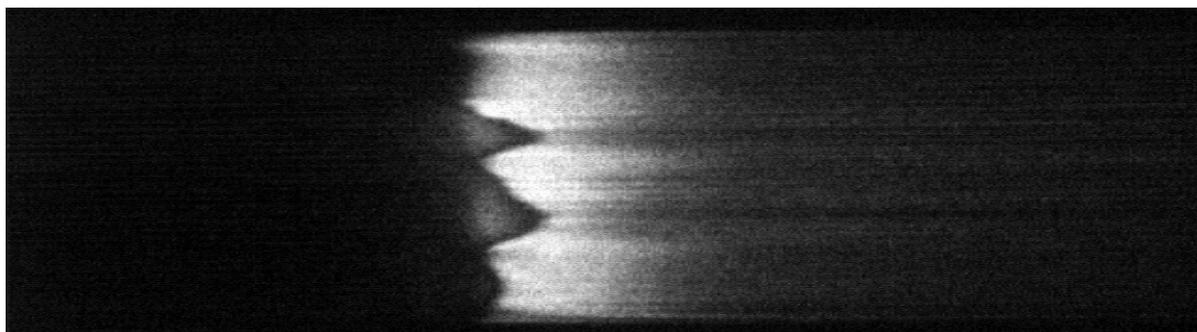


Рис.3.2. Камера К004М: линейная развёртка искры в воздухе (длительность развёртки 355нс).

Зато высокая чувствительность камеры позволила измерить среднюю скорость свечения начального процесса (нисходящего лидера), составившую  $6 \times 10^7$  см/с.

На рис.3.3 показано изображение развёртки при включённом сбросе усиления яркости до нуля по сигналу фотодатчика. Оценка быстродействия сброса по профилю яркости показывает, что оно составляет  $\sim 70$ нс.

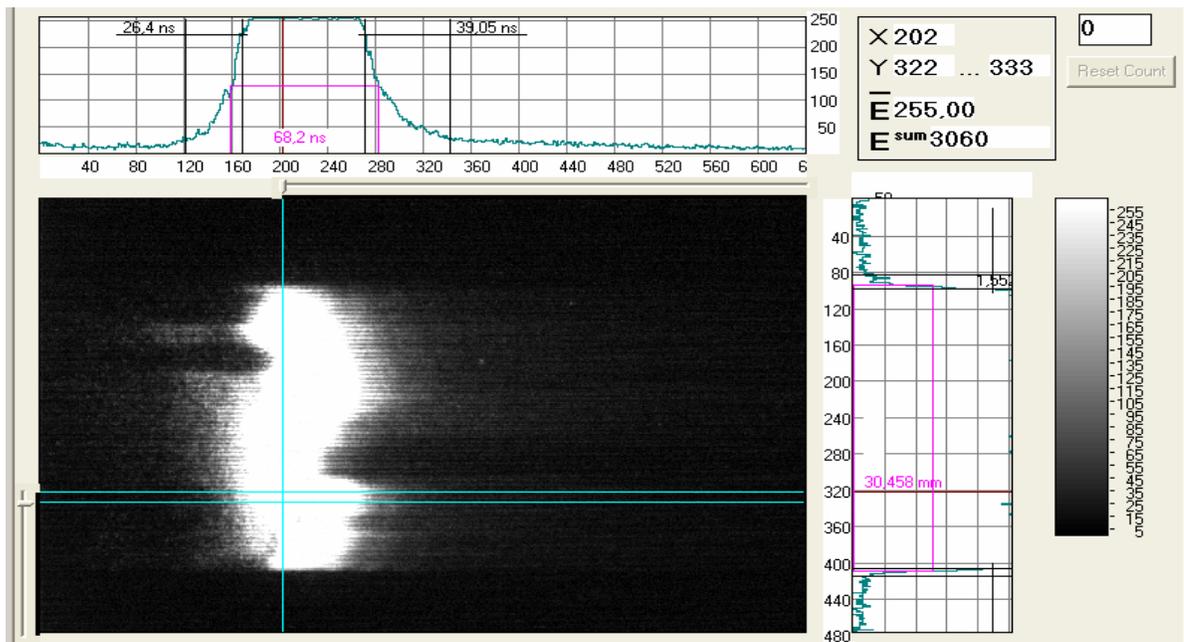


Рис.3.3. Камера К004М: развёртка искры при включённом сбросе усиления яркости до нуля (длительность развёртки 355нс).

На рис.3.4 показана развёртка искры при большом входном сигнале камеры (диафрагма входного объектива была полностью открыта) и небольшом усилении яркости. При этом яркость изображения насыщения не достигает, но из-за большой плотности тока фотокатода ЭОП поле его электронной линзы искажается. Это в зависимости от степени искажения поля линзы приводит прежде всего к снижению пространственного разрешения ЭОП или одновременно, как в случае, показанном на рис. 3.4, и к потере пространственного разрешения, и к сильным геометрическим и фотометрическим (неправильная передача градаций яркости) искажениям изображения. Как правило, по мере возрастания входного сигнала выше

критического значения изображение сжимается, а при убывании восстанавливает свои неискажённые размеры.

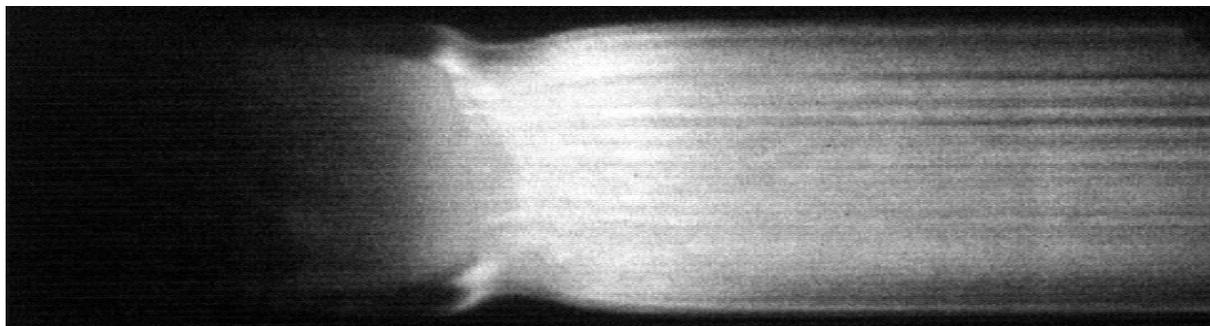


Рис.3.4. Камера К004М: искажения изображения при перегрузке фотокатода ЭОП большим входным сигналом (длительность развёртки 355нс).

В инструкциях по эксплуатации камер дана методика проверки интенсивности входного сигнала относительно критического значения. Для этого на вход ЭОП необходимо установить тест-объект (в зависимости от вида развёртки) в виде щелевой или кадровой (двумерной) миры и осветить её при развёртке изображением регистрируемого объекта. Если при этом пространственное разрешение соответствует паспортным данным, то перегрузки фотокатода ЭОП входным сигналом нет (см. рис.3.5 и 3.6).

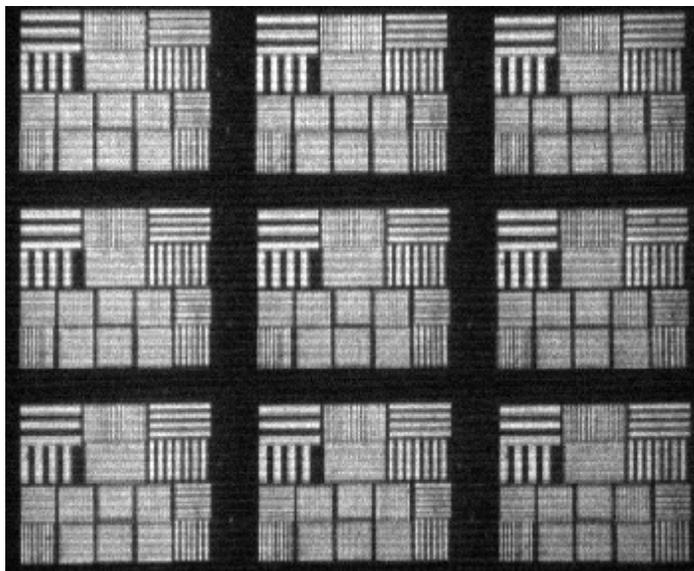


Рис.3.5. Камера К004М: 9-ти кадровая развёртка миры без перегрузки ЭОП .

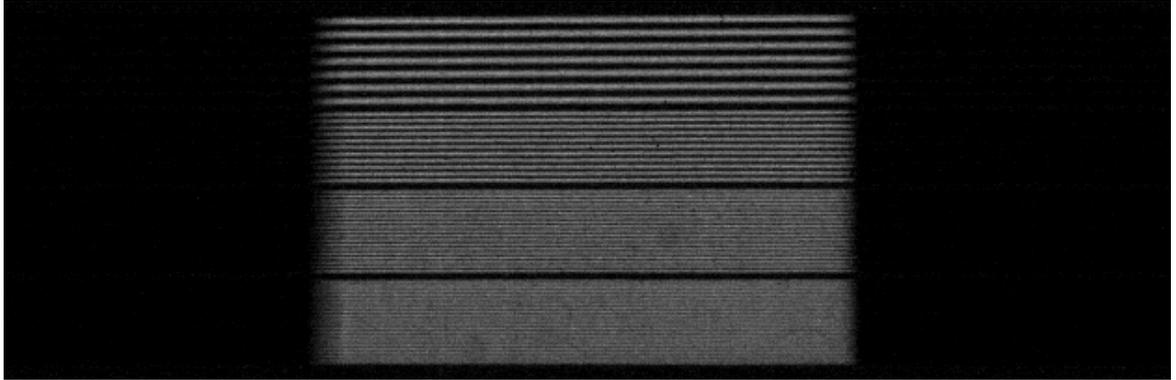


Рис.3.6. Камера K008: развёртка щелевой миры без перегрузки ЭОП.

На рис.3.7 показан сброс усиления яркости при развёртке щелевой миры.

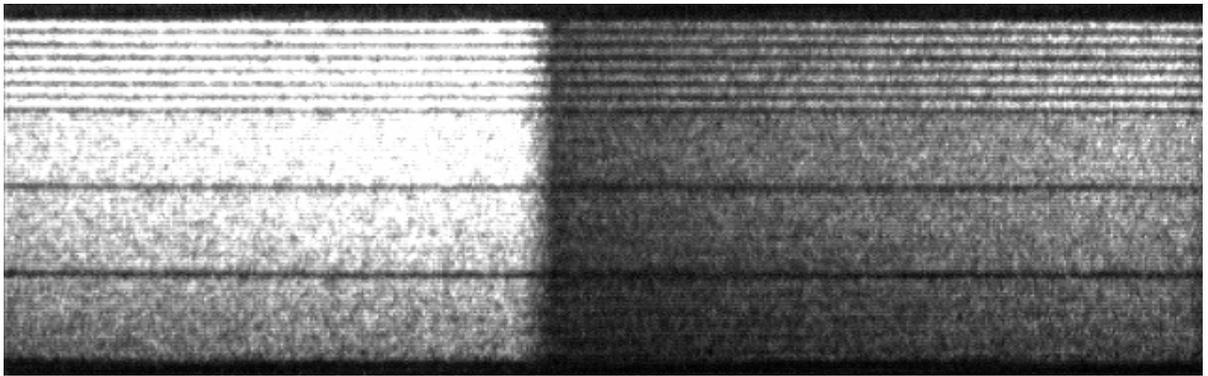


Рис.3.7. Камера K004M: сброс усиления яркости в процессе развёртки изображения щелевой миры.

На следующих снимках (рис.3.8-3.10) показаны изображения той же искры длиной ~30мм, полученные с помощью камеры K008.

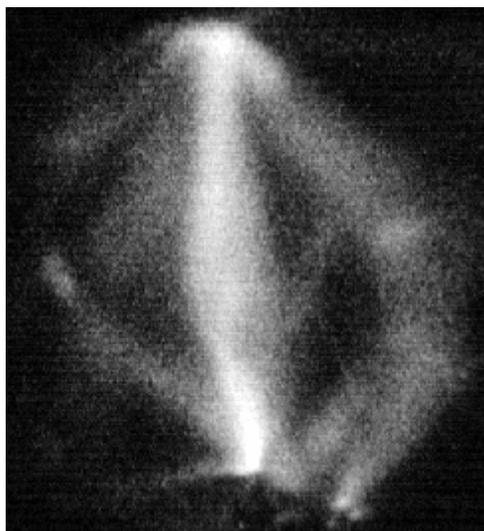


Рис.3.8. Камера К008: стримеры и почти сформировавшийся сквозной канал длиной ~30мм в момент, непосредственно предшествующий началу наиболее яркой стадии разряда (длительность кадра 0,2мкс).

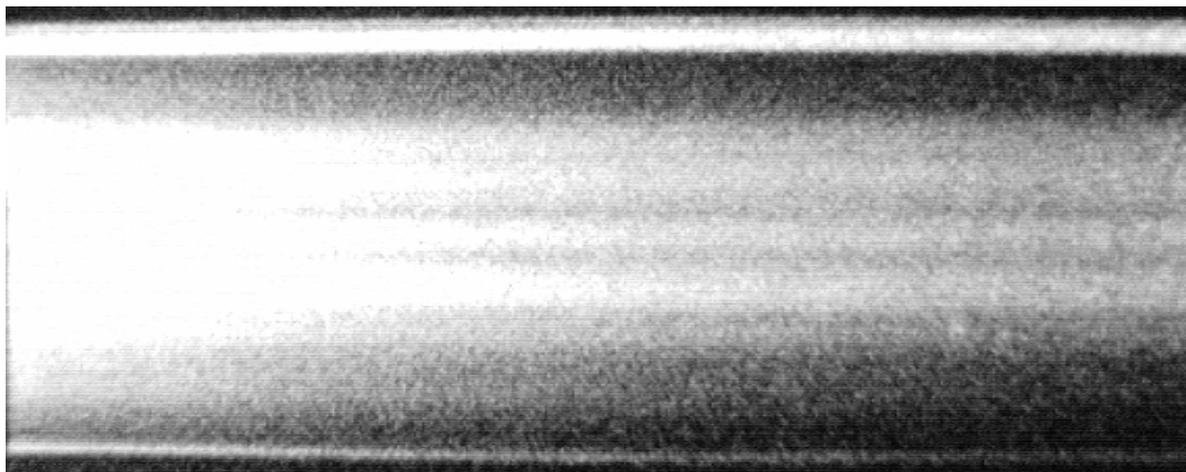


Рис.3.9. Камера К008: релаксация первой яркой вспышки разряда (длительность развёртки 0,2 мкс).

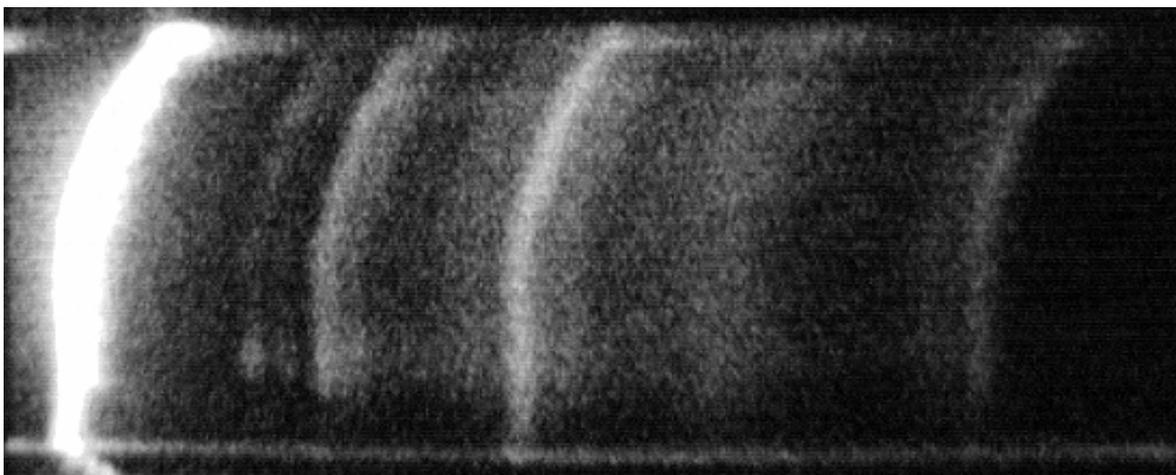
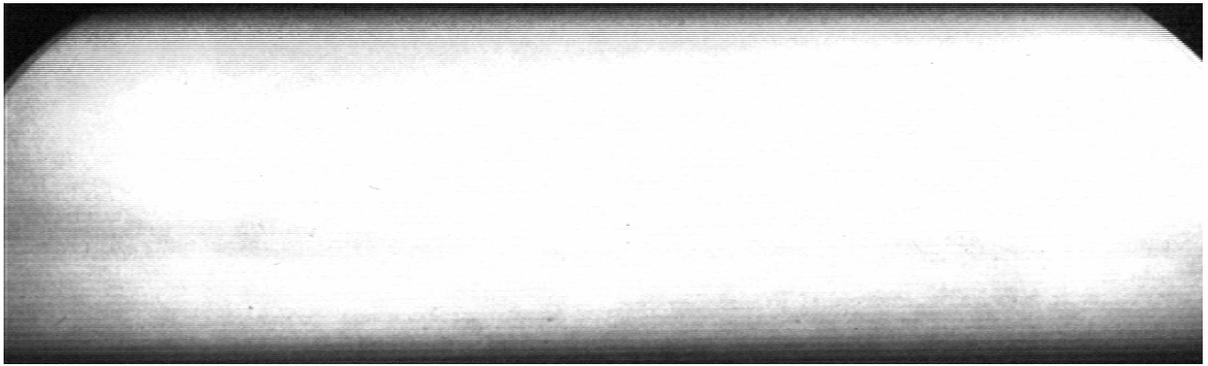


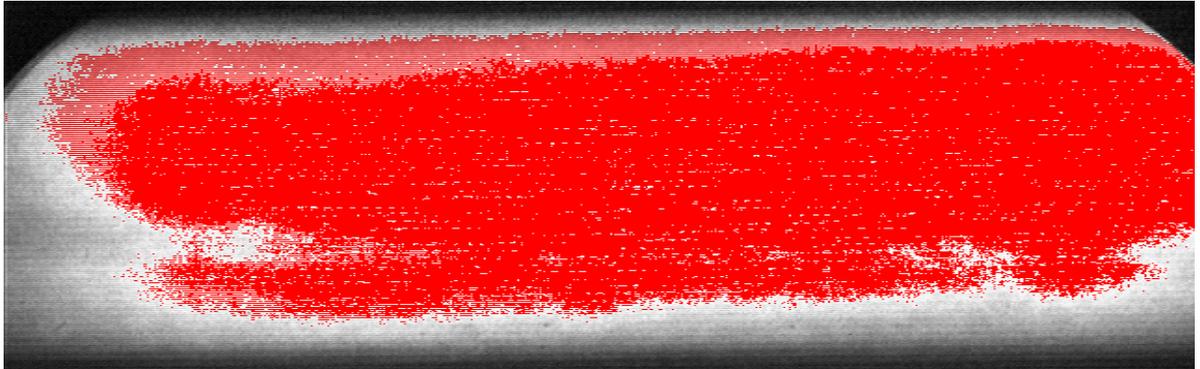
Рис.3.10. Камера К008: колебательный характер изменения яркости канала разряда (длительность развёртки 6мкс).

#### 4. Регистрация естественных молний

После окончания демонстрации, описанной в п.3, неожиданно разразилась редкая для этого времени года сильная гроза, длившаяся около часа. Камера К004М с фотодатчиком были срочно подняты на крышу корпуса в стеклянную обсерваторию, где было сделано около 30 снимков линейной развёртки изображения естественных молний, из которых на 20 снимках присутствовало какое-то свечение. При этом на входе камеры использовался широкоугольный объектив МИР-10А (угол поля зрения  $75^{\circ}$ ), специально предназначенный для фотографирования крупноразмерных объектов. Длительность развёртки составляла 1065мкс. Несмотря на то, что фотодатчик, направленный точно на тот же участок, что и камера, исправно реагировал пусковым каналом на каждую вспышку, а иногда и вторым каналом, по сигналу которого в камере в процессе развёртки происходил сброс усиления яркости, практически ни один снимок не оказался достаточно информативным, то есть более или менее понятным. Снимки в своём большинстве однообразны, сильно пересвечены (полутон почти не видно, хотя исходное усиление яркости и степень его сброса регулировались) и представляют собой развёртку однородно освещённого фотокатода ЭОП. Лишь на нескольких снимках (см. рис.4.1- 4.3, масштаб по вертикали один и тот же) видны контуры изображений, более явно проступающие при псевдоокрашивании равноярких зон этих изображений.



а



б

Рис.4.1. Камера К004М: а - развёртка (длительность 1065мкс) естественной молнии, б – то же самое при псевдоокрашивании равноярких зон.

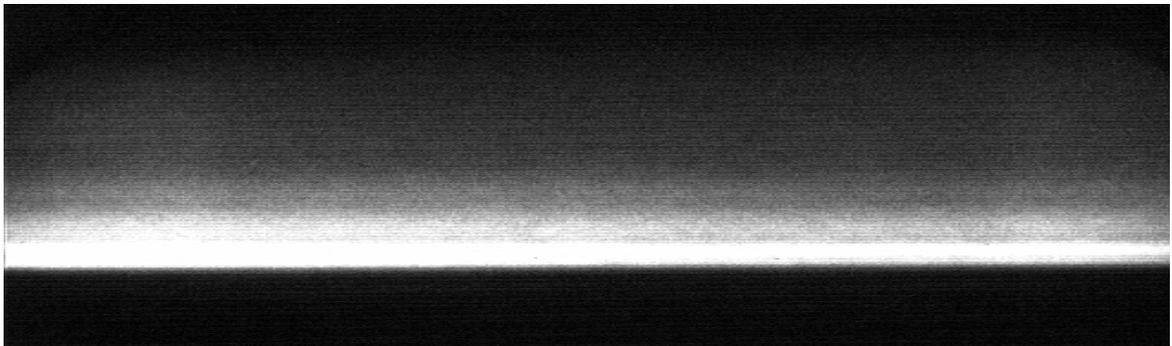
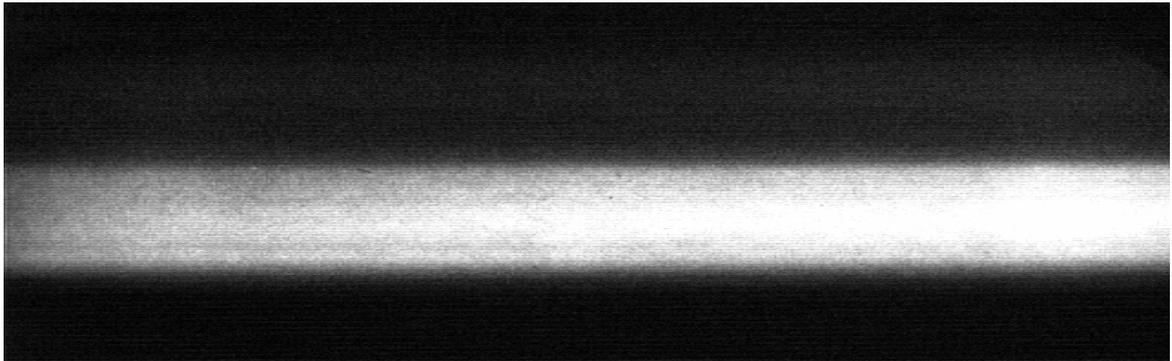
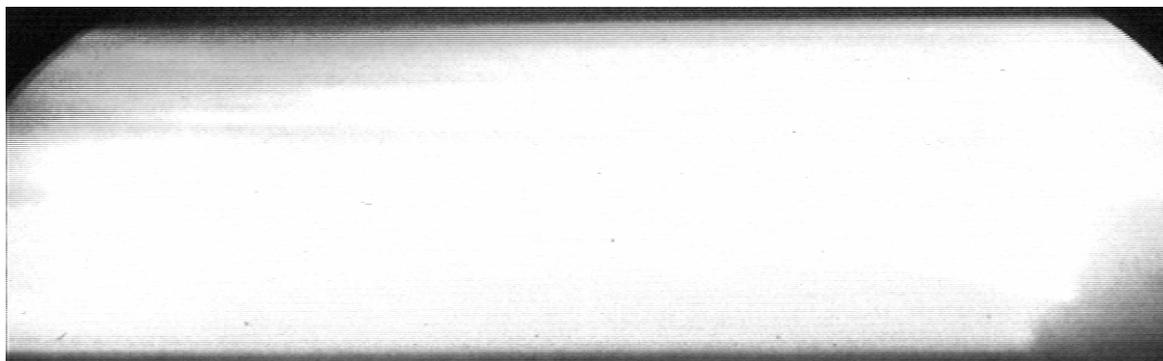


Рис.4.2. Камера К004М: развёртки (длительность 1065мкс) 2-х естественных молний, каналы которых были ориентированы почти горизонтально.

И только на одном снимке в конце развёртки её светлое поле имеет косой (слева направо и снизу вверх) изломанный срез, резко переходящий в тёмное поле (рис.4.3а). Это сработал сброс усиления яркости на этот раз не до нуля, в результате чего на границе белого и тёмного полей оказалась записанной форма канала молнии в момент начала возвратного удара.



а



б

Рис.4.3. Камера К004М: а - развёртка (длительность 1065мкс) естественной молнии, б – то же самое при псевдоокрашивании равноярких зон.

Тогда всё, что записано до начала возвратного удара, должно быть изображением развёртки лидера. Причём, судя по большому наклону фронта его свечения слева направо и снизу вверх по сравнению с ориентацией канала возвратного удара, на рис.4.3 зарегистрирована восходящая молния.

Причина неудачи большинства снимков, видимо, состояла в том, что в фотодатчике чувствительность 2-го канала, управляющего моментом сброса усиления яркости, была сильно загрублена фильтрами. Поэтому сброс

усилении яркости во всех случаях, кроме одного, что на рис.4.3, не работал и яркая стадия молнии, образно говоря, “заливала” изображение на всей развёртке. Поскольку и на указанном снимке изображение лидерной стадии также пересвечено, это означает, что чувствительность камеры была слишком высокой и нужно было уменьшать её не только снижением исходного напряжения на МКП ЭОП, но и установкой светофильтров на входной объектив или его диафрагмированием, чтобы исключить возможные негативные эффекты, связанные с перегрузкой фотокатода большим входным сигналом. Однако в той авральной обстановке это не было сделано.

Поскольку расшифровка линейных развёрток изображения естественных молний представляется гораздо более сложной по сравнению с расшифровкой серии снимков покадровой съёмки, то в следующий раз регистрацию имеет смысл начать в режиме многокадровой развёртки.

### **Заключение**

Приведенные здесь результаты первых пробных экспериментов свидетельствуют о том, что высокоскоростная регистрация молний, как триггерных, так и особенно естественных, с помощью электронно-оптических камер является гораздо более сложной и трудоёмкой задачей по сравнению с регистрацией искусственных разрядов в длинных воздушных промежутках, инициируемых высоковольтными импульсными источниками.

Так, в /1/ генератор импульсов напряжения работал сериями с интервалом между разрядами ~2 минуты. В течение недели было произведено более 1500 разрядов, большая часть которых использовалась для настройки фотодатчика и камер. Настройка заключалась в последовательном подборе оптики (объективов и фильтров), порогов запуска, исходного усиления яркости в камерах и степени его сброса в яркой стадии разряда и др.. После отсева пустых кадров или кадров только с яркой стадией разряда осталось лишь около 600 кадров (то есть чуть более трети), содержащих богатую информацию о лидерной стадии и о переходе её в стадию возвратного удара.

Подобного количества удачных разрядов за грозовой сезон невозможно иметь ни при триггерных, ни, тем более, при естественных молниях. Поэтому только всесторонний и глубокий анализ полученных результатов, изложенных выше, практические шаги по всемерному повышению

вероятности удачной регистрации изображения молний и более точной расшифровке полученных изображений являются залогом будущих успехов в этом не простом деле. Именно залогом, но не гарантией, так как есть ещё такое обстоятельство, как везение. Последнее, как следует из изложенного выше, весьма немаловажно.

В этой связи в отношении триггерных молний в преддверии следующего грозового сезона целесообразными представляются следующие действия:

1. Разработка более быстродействующего программного обеспечения ПЗС телекамер, позволяющего регистрировать изображение каждого разряда триггерной молнии, следующего за её начальной стадией. При этом устройство блокировки нужно будет перепрограммировать так, чтобы оно после каждого срабатывания электронно-оптических камер блокировало возможность их запуска только на время считывания телевизионными камерами зарегистрированного изображения и записи его в компьютер.

2. Осциллографическая запись контрольных импульсов электронно-оптических камер, что позволит сопоставлять моменты срабатывания камер и моменты сброса усиления яркости с записями осциллограмм токов разрядов и импульсов четырёхканального фотодатчика (см. начало п.2), контролирующего свечение на разных высотах, и, таким образом, более точно расшифровывать полученные изображения.

Что касается естественных молний, то для того, чтобы знать масштаб (увеличение) фотографирования, нужно знать расстояние от камеры до молнии. В случае триггерных молний оно точно известно, в случае естественных – нет. Для измерения расстояния до естественных молний следует использовать таймер с вычислительным устройством, запускаемый импульсом 2-го канала фотодатчика ФД001 от излучения возвратного удара и останавливаемый в момент прихода звуковой волны к микрофонному датчику в месте установки камеры. Вычислительное устройство должно в цифровом виде выдавать в компьютер значение дальности до молнии. Тогда, вычислив масштаб фотографирования как отношение фокусного расстояния входного объектива камеры к расстоянию от камеры до молнии и зная размеры зарегистрированного изображения на фотокатоду ЭОП, легко определить истинные размеры всей молнии или любого её фрагмента.

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.

Несмотря на то, что первые результаты регистрации изображения естественных и триггерных молний оказались скромными и не принесли ожидаемого удовлетворения, это никак не означает, что электронно-оптические камеры работали неудовлетворительно.

В заключение авторы выражают благодарность Д.М. Джордану за помощь в разработке устройства блокировки от преждевременного и повторного запуска камер, К.Дж. Рэмбо и Дж. Джеролду за всестороннюю организационную и техническую помощь в проведении экспериментов, а также всем штатным и внештатным сотрудникам полигона, обеспечивавшим его работоспособность и “боеготовность” в течение грозового сезона 2004г.

#### Литература

1. Shcherbakov Y.V. , Lebedev V.B. , Rakov V.A. , Feldman G.G. , Sukharevskij D.I. , Gorin B.N. , Syssoev V.S. , Karpov M.A. and Senik A.V., High-speed optical studies of long spark (Istra, Russia) and triggered lightning (Camp Blanding, Florida): Initial results, Proceedings of the 25th International Congress on High-Speed Photography and Photonics (France, 2002), SPIE, Vol. 4948 , pp. 837 – 845.
2. Vitali B. Lebedev, Grigory G. Feldman, Boris N. Gorin , Yuri V.Shcherbakov, Vladimir S. Syssoev, Vladimir A. Rakov, Features of Application of Image Converter Cameras for Research on Lightning and Discharges in Long Air Gaps, Proceedings of the 26th International Congress on High-Speed Photography and Photonics (USA, 2004), SPIE, Vol.5580, pp. 887-897.
3. V.B. Lebedev, G.G. Feldman, Super small single streak and single frame image converter camera, SPIE, Vol. 3516, pp. 85-91.
4. В.Б. Лебедев, Г.Г. Фельдман, Б.Н. Горин, Ю.В. Щербаков, В.С. Сысоев, В.А. Раков. Особенности применения электронно-оптических камер при исследованиях молнии и разрядов в длинных воздушных промежутках, см. настоящий сборник, **стр.???**
5. V.A. Rakov et al, «Lightning properties from triggered – lightning experiments at Camp-Blanding, Florida (1997-1999)», Proc. 25<sup>th</sup> ICLP, Rhodes, 2000, pp. 54-59.