



# Физические основы УФ-инспекции

Лекция № 2  
из цикла «УФ-инспекция»

# Принцип действия УФ инспекции



□ Основное требование к высоковольтному оборудованию – отсутствие видимой короны (КР) и разрядов на поверхности изоляции (ПЧР) при наибольшем рабочем напряжении. При отклонениях от нормального состояния оборудования и/или неблагоприятных метеоусловиях на проводах, шинах, арматуре возникают КР, а на изоляции КР и ПЧР.

□ В основе УФ инспекции – регистрация оптического излучения КР и ПЧР (локация очага и оценка интенсивности разрядов) с последующей интерпретацией результата: анализом причин возникновения разрядов, прогнозированием вида дефекта и его последствий.

## Характеристики воздуха как среды формирования разрядов

Компонент	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ar
Размер молекулы, А	3,2	2,9	2,4	3,3	2,9
Концентрация, % объёма	78	21	0,01	0,03	0,93

Некоторые свойства сухого воздуха при T = 20 °С, P = 1,01 · 10<sup>5</sup> Па

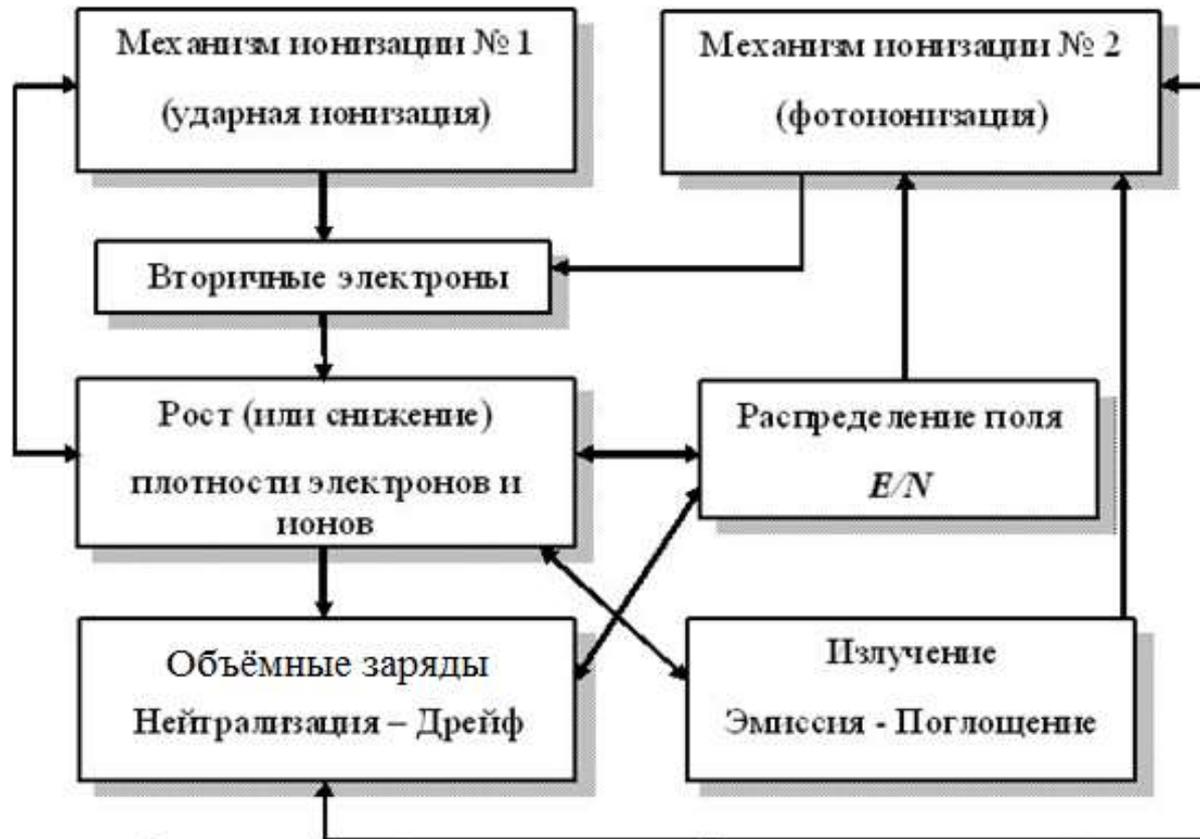
Плотность	Удельная теплоёмкость	Теплопроводность	Кинематическая вязкость	Удельное сопротивление
кг/м <sup>3</sup>	кДж / (кг · К)	Вт / (м · К)	(м <sup>2</sup> / с) · 10 <sup>-6</sup>	Ом·см
1.205	1.005	0.0257	15.11	10 (E17)

Электрическая прочность воздуха в однородном поле, кВ/см

$$E_{\text{пр}} = 24.5 + 6.4 \sqrt{1/d}$$

где  $d$  – длина разрядного промежутка, см

# Механизмы ионизации в «холодных» разрядах



Разрядные процессы принципиально могут быть описаны системой дифференциальных уравнений. С помощью этих уравнений можно рассчитать  $I$ ,  $E/N$ ,  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $\beta$  и др.

- Интенсивность ионизации при заданном значении напряжённости электрического поля зависит от энергии ионизации газа (кислород – 12.1 эВ, азот – 15,6 эВ), и средней длины свободного пробега электронов (при атмосферном давлении около 0.3 мкм).
- Учитывая характерные величины напряжённости поля, приходим к выводу, что основная масса электронов, имеет энергию меньше энергии прямой ударной ионизации. Поэтому преобладают механизмы ступенчатой ионизации и ассоциативной фотоионизации:  $O^*_2 + N_2 \Leftrightarrow NO + NO(+) + e$ ;  
 $O^*_2 + N_2 \Leftrightarrow O_3 + O(+) + e$ ;  $N + O + 2,8 \text{ эВ} \Leftrightarrow NO(+) + e$ .
- Скорость дрейфа электронов определяется их подвижностью и напряжённостью электрического поля

$$V_e \approx \mu_e \cdot E$$

где  $\mu_e = 4.34 \text{ м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  – подвижность электронов.

# Элементарные процессы в разрядах в воздухе более 150



## Наиболее важные из них для УФ-инспекции:

1. **Возбуждение** электронным ударом  $A + e \rightarrow A^* + e$ . Наиболее вероятны возбуждения молекул азота на вращательные ( $j$ ), колебательные ( $\nu$ ) и электронные ( $n$ ) уровни энергии. На один акт ударной ионизации приходится порядка 10  $n$ -, 100  $\nu$ - и 1000  $j$  актов возбуждений.

2. **Излучение** при сбросе возбуждения  $A^* \leftrightarrow A + h\nu$ , более вероятное при столкновениях с другими частицами. Часть фотонов поглощается с повторным возбуждением нейтральных частиц на тот или иной уровень.

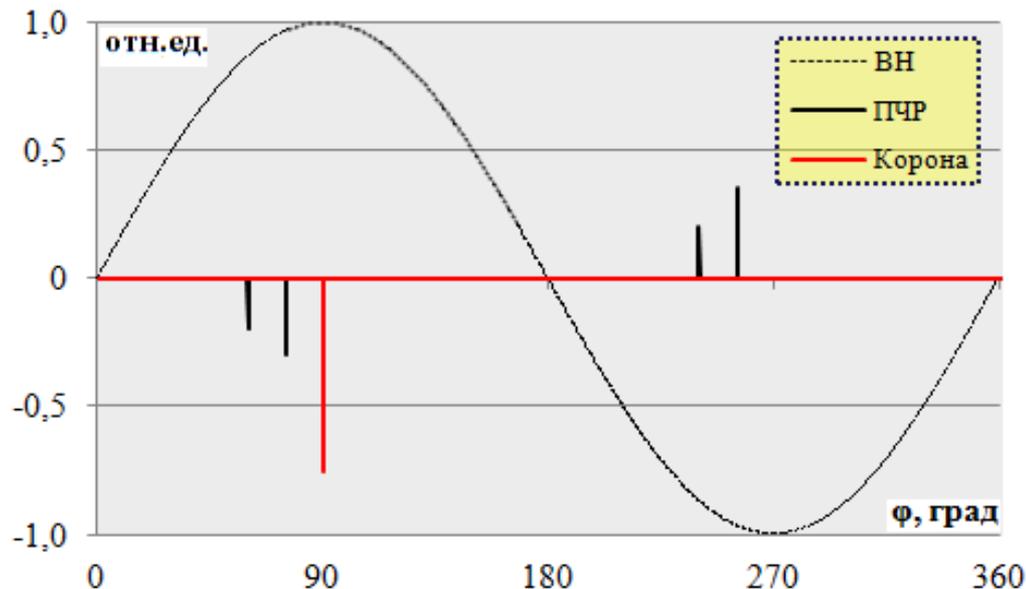
3. Большая часть энергии излучения сосредоточена в ближнем ультрафиолете с  $\lambda = 300 \dots 400$  нм.

# Физический механизм короны— преимущественно стримерный

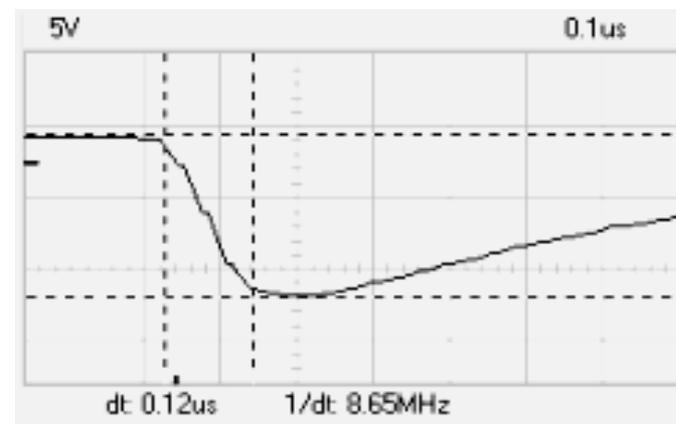


- ❑ Катодонаправленные стримеры возникают на максимуме полупериода положительной полярности при напряжённости электрического поля на аноде порядка 25 кВ/см, и останавливаются в поле с напряжённостью около 5 кВ/см
- ❑ Погонный заряд стримеров  $\sim 1$  нКл/см. Длина каналов разрядов от 1 см (на оборудовании 110 кВ) до 10 см и более (на оборудовании 500, 750 кВ). Следовательно, заряд вспышки – 1...10 нКл. Рассеиваемая энергия 0,1...1 мкДж.
- ❑ Время развития 40...120 нс, частота повторения  $\geq 10$  Гц.

# Импульсы тока коронных и поверхностных разрядов на сухих изоляторах

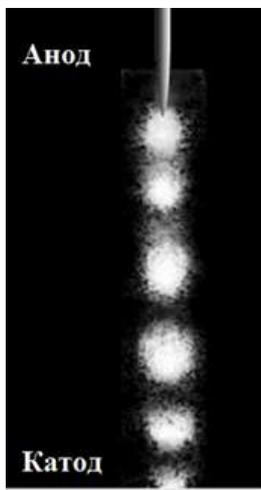


Стилизованная осциллограмма электрических сигналов КР и ПЧР



Осциллограмма сигнала КР с зарядом 5,5 нКл.  
Длительность - 120 нс

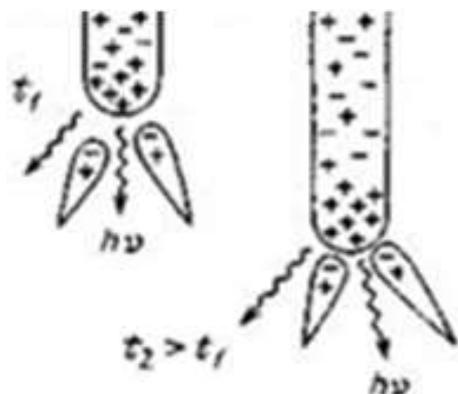
# Механизм развития стримера



Съёмка в стробоскопическом режиме. Длительность кадра 1,26 нс, интервал между кадрами 5 нс. Светящаяся область – головка стримера, область со значительной концентрацией электронов.

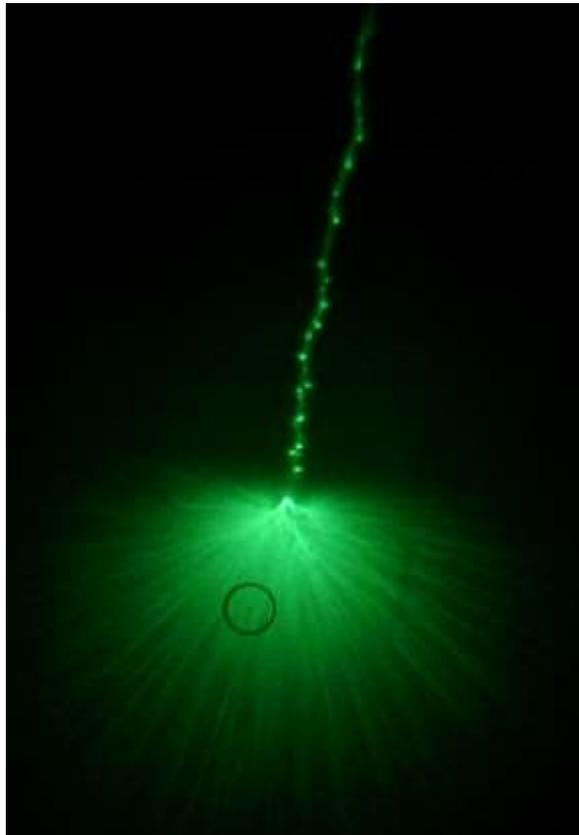


Схема стримера

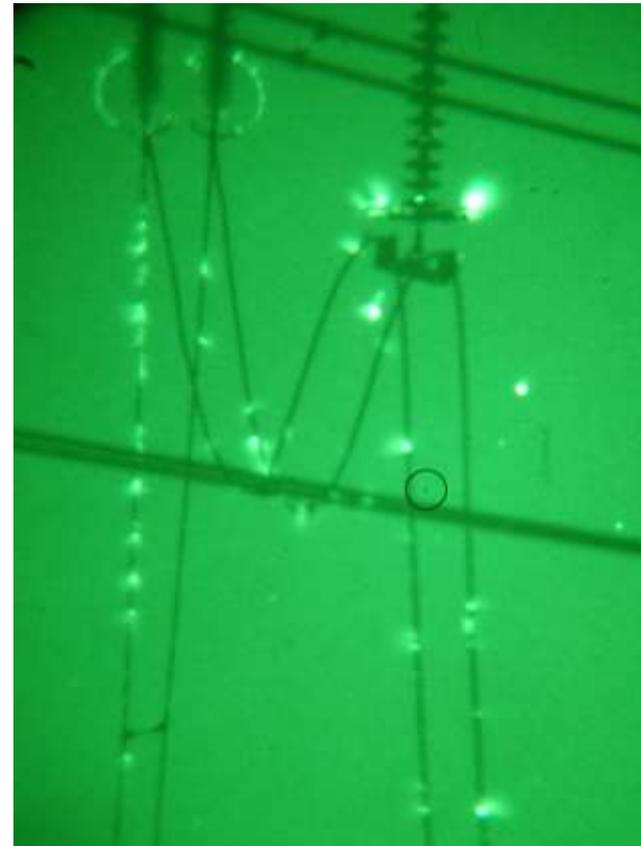


Стример в два последовательных момента времени  $t_1$  и  $t_2$  : показаны вторичные лавины, стремящиеся к положительной головке стримера, волнистые стрелки – фотоны, от которых появляются затравочные электроны для лавин

# Изображения коронирующих элементов, полученные дефектоскопом «Филин-6»

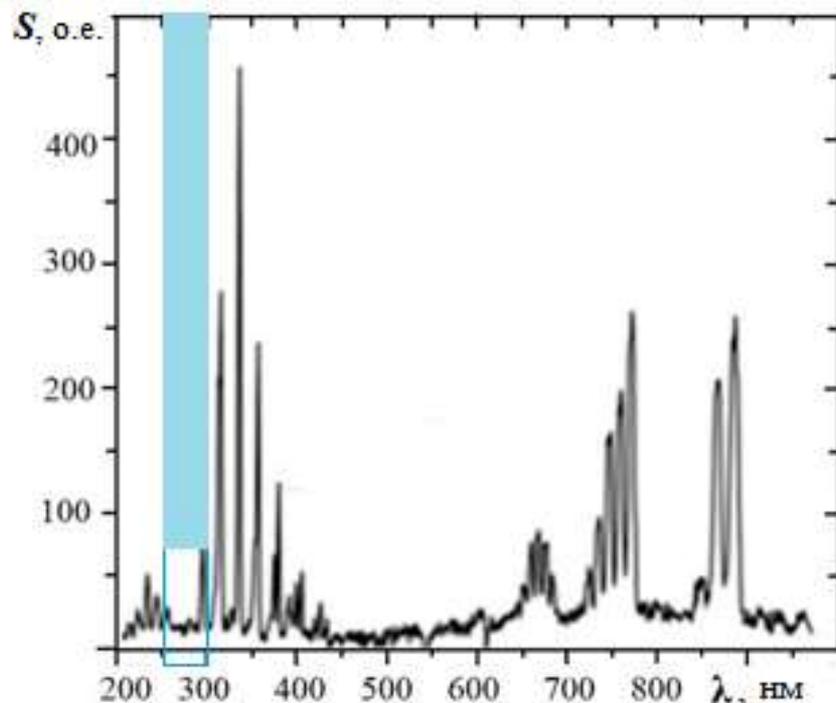


Наброс проволоки



Корона на арматуре и  
шинах ПС 500 кВ

# Спектр излучения короны

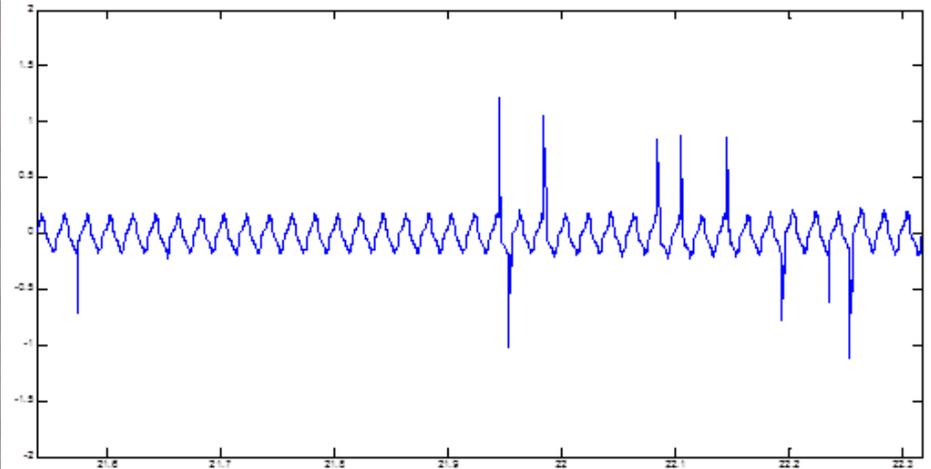


Спектр излучения короны в УФ-участке – линейчатый, обязан сбросам возбуждения колебательных и электронных уровней энергии молекул воздуха, особенно, молекул азота.

К сожалению, максимальная энергия излучения на длине волны 260 нм (4,75 эВ) примерно в 50 раз меньше, чем на 337,1 нм.

# Механизм поверхностных частичных разрядов

– стримерный с переходом (при увлажнении и загрязнении изоляции) в дуговой.

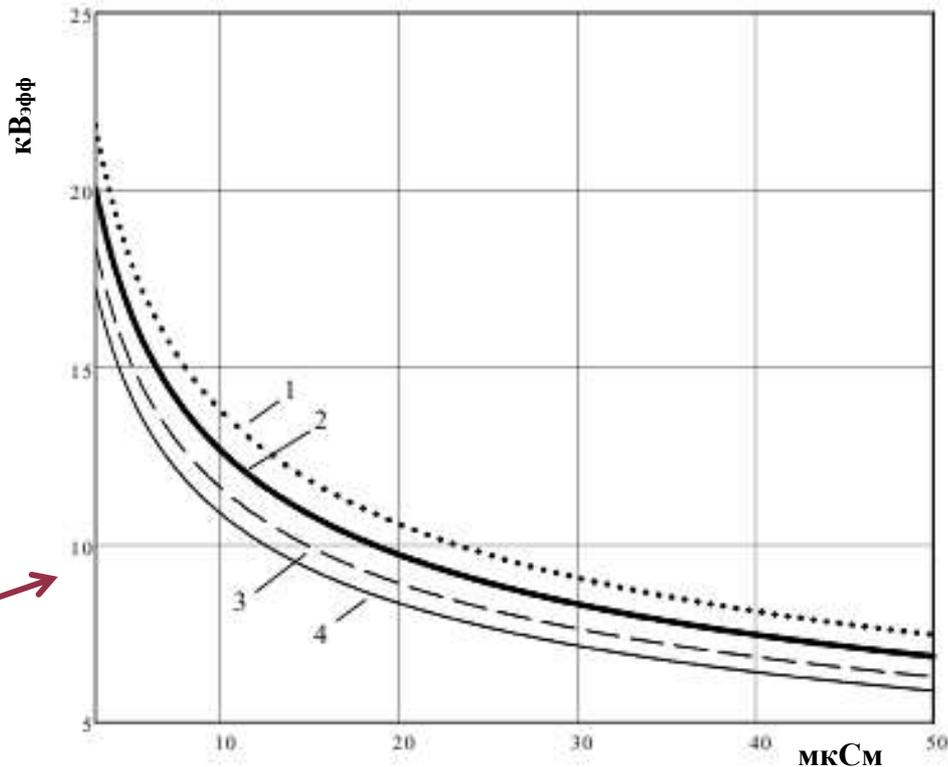
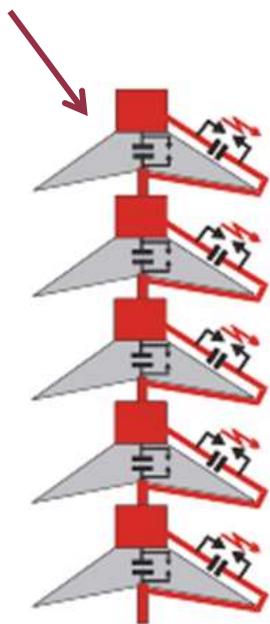


Внешний вид ПЧР и ток утечки  
загрязнённого и увлажнённого изолятора

# Стадии перекрытия загрязнённой изоляции: ПЧР-дужки-перекрытие 1-го изолятора-перекрытие гирлянды

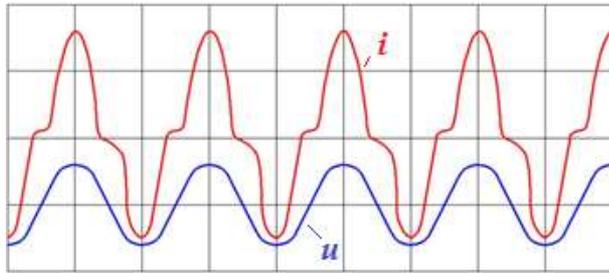


Перекрытие  
отдельного  
изолятора и всей  
гирлянды

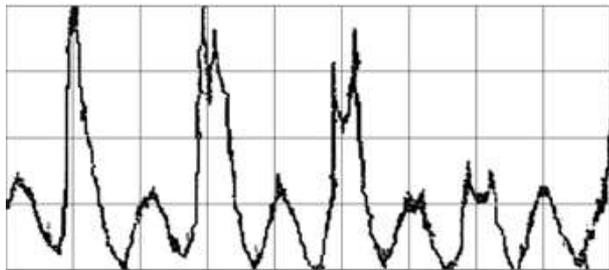


Зависимость 50%-ных разрядных напряжений от удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения, при: 1 –  $L_u = 38$  см,  $K_u = 1,2$ ;  
2 –  $L_u = 32$  см,  $K_u = 1,1$ ; 3 –  $L_u = 28$  см,  $K_u = 1,05$ ; 4 –  $L_u = 25$  см,  $K_u = 1$

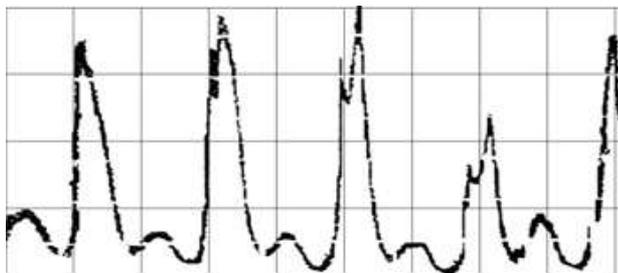
## Изменения в спектре излучения - на стадии образования дужек появляется красная составляющая



а



б



в

Осциллограммы сигналов при  $\chi = 12$  мкСм:

а – тока утечки (масштаб 20 мА/дел.) и напряжения (60 кВ/дел.) на изоляторе;  
б и в – интенсивность излучения разрядов в синей (0,1 В/дел.) и в красной (0,5 В/дел.) областях спектра.

**Интенсивность излучения красного цвета в 5 раз больше интенсивности синего цвета!**