

# Вариации космических лучей во время гроз

---

А.С. Лидванский  
ИЯИ РАН



Что представляет собой грозовое облако с точки зрения физики частиц?

Гигантскую газоразрядную камеру

---

**Газоразрядный счетчик**

Постоянное электрическое поле

Фиксированный объем

Поток частиц произвольный

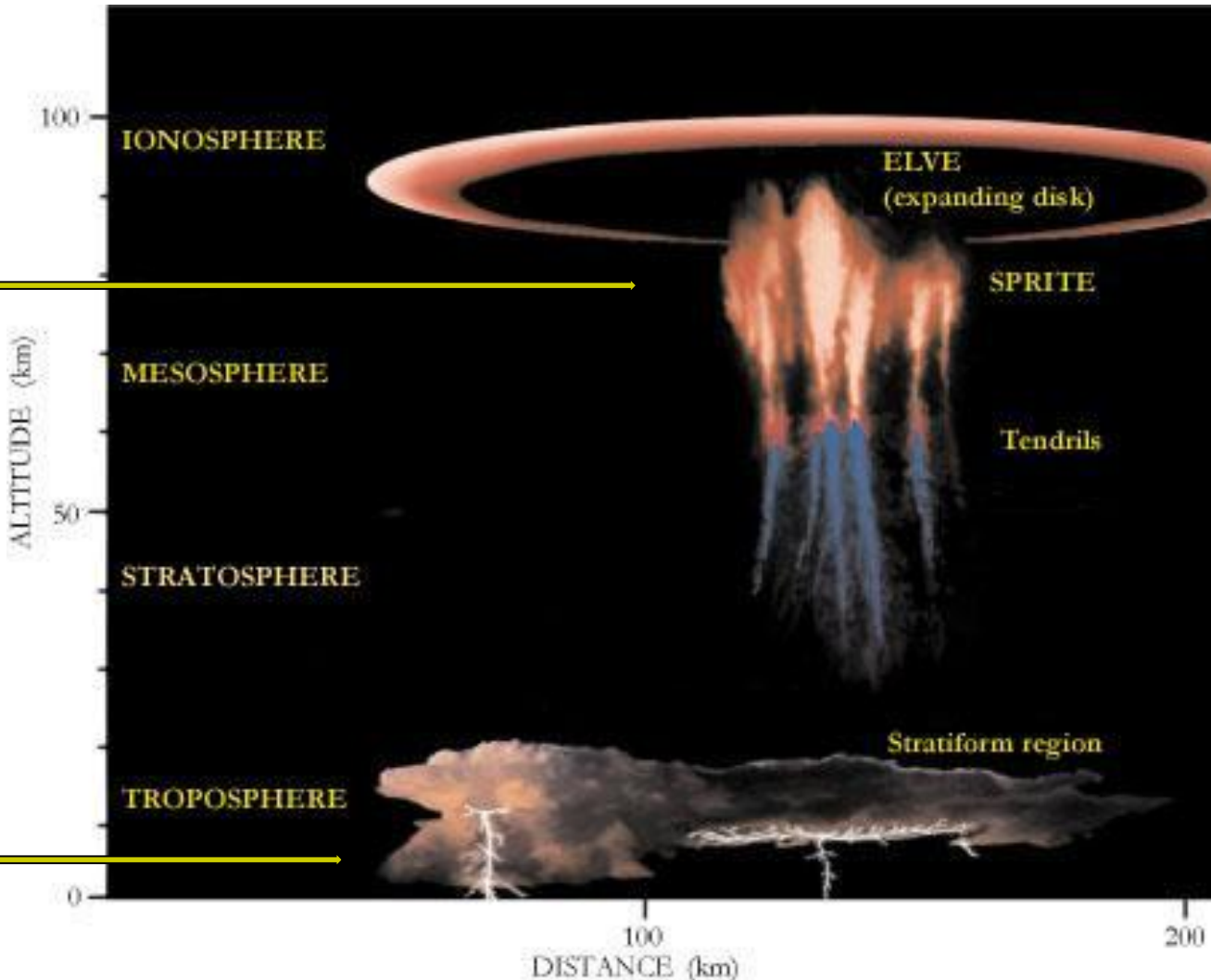
**Грозовое облако**

Меняющееся электрическое поле

Меняющийся и движущийся объем

Квази-постоянный поток частиц

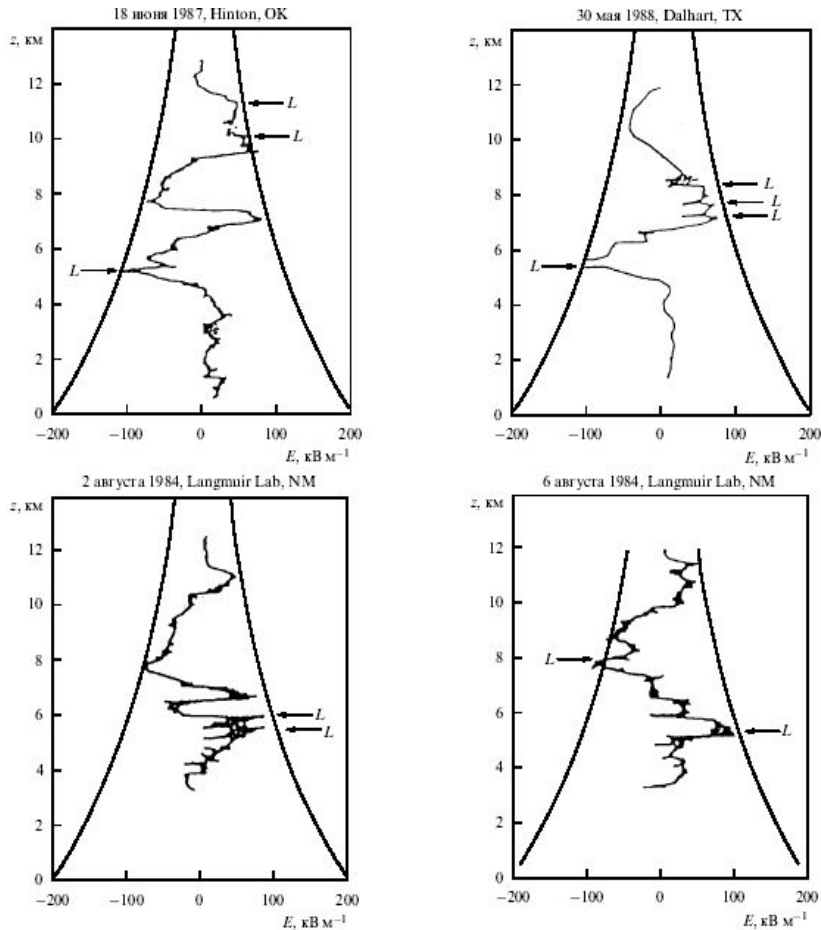
Различные типы разрядов напоминают различные типы детекторов частиц. Космические лучи играют важную роль в этих процессах



Режим счетчика Гейгера

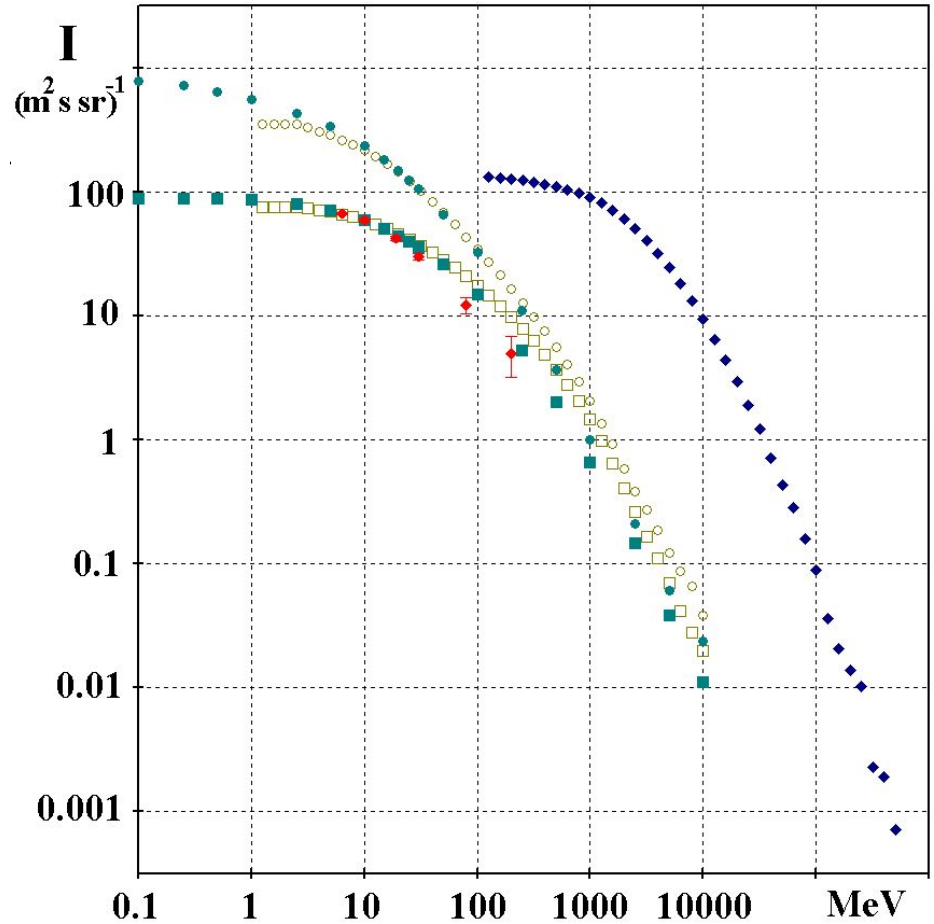
Режим искровой камеры

# Поля



Примеры вертикальных профилей электрического поля измеренных на баллонах (Marshall et al., 1996)

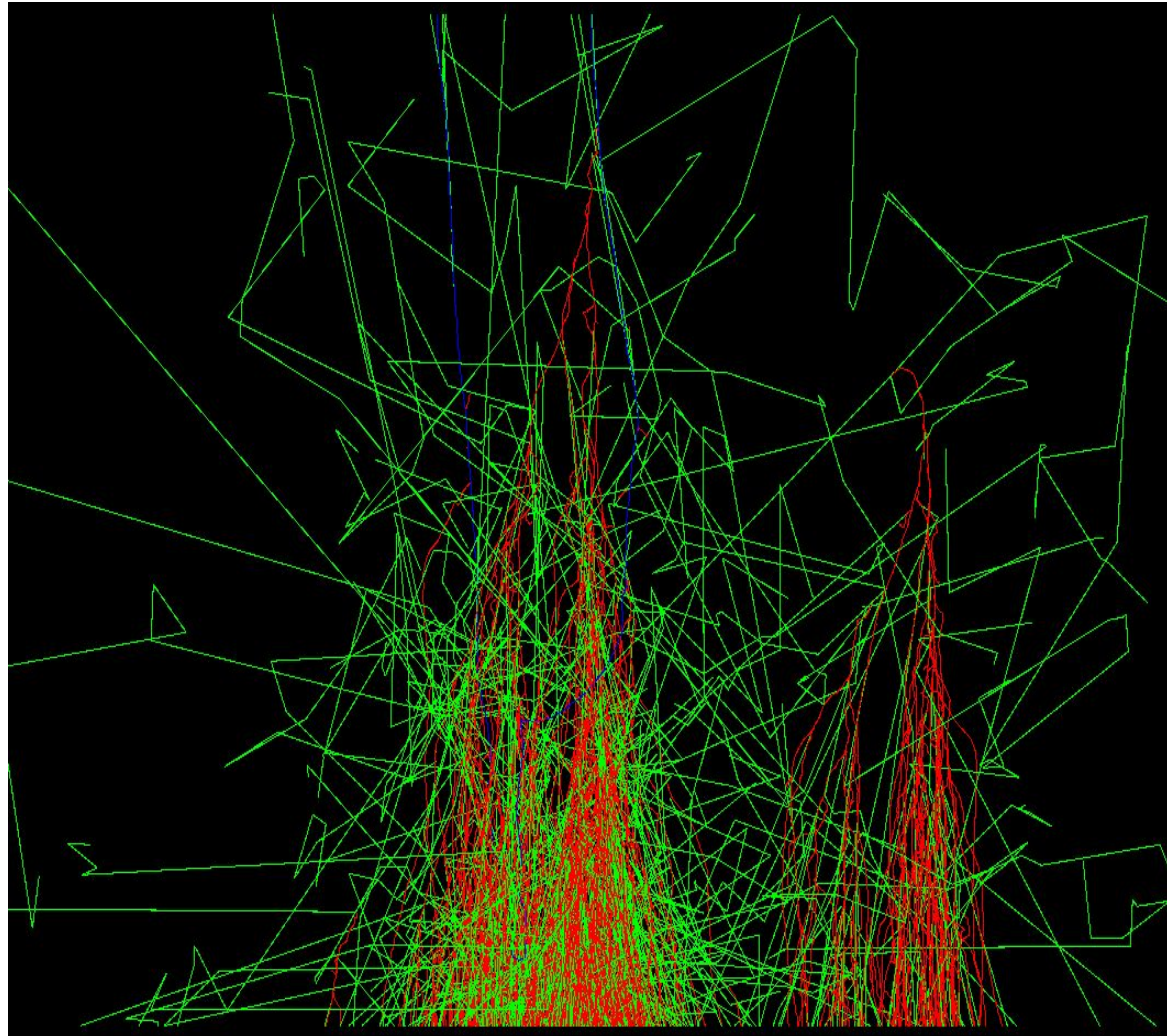
# Частицы



Интегральные спектры вертикальных потоков электронов, позитронов, фотонов и мюонов на высоте 840 г/см<sup>2</sup> (1700 м над уровнем моря). **◆◆◆** одиночные электроны и позитроны, эксперимент. **■ ■ ■**, **□ □ □** спектры электронов и позитронов, **● ● ●**, **○ ○ ○** гамма-кванты, **◆ ◆ ◆** мюоны.

Каскады частиц генерированные одиночным электроном с энергией 1 МэВ в однородном электрическом поле напряженностью 5 кВ/см

---



# Баксанская установка для изучения ШАЛ

## Ковер

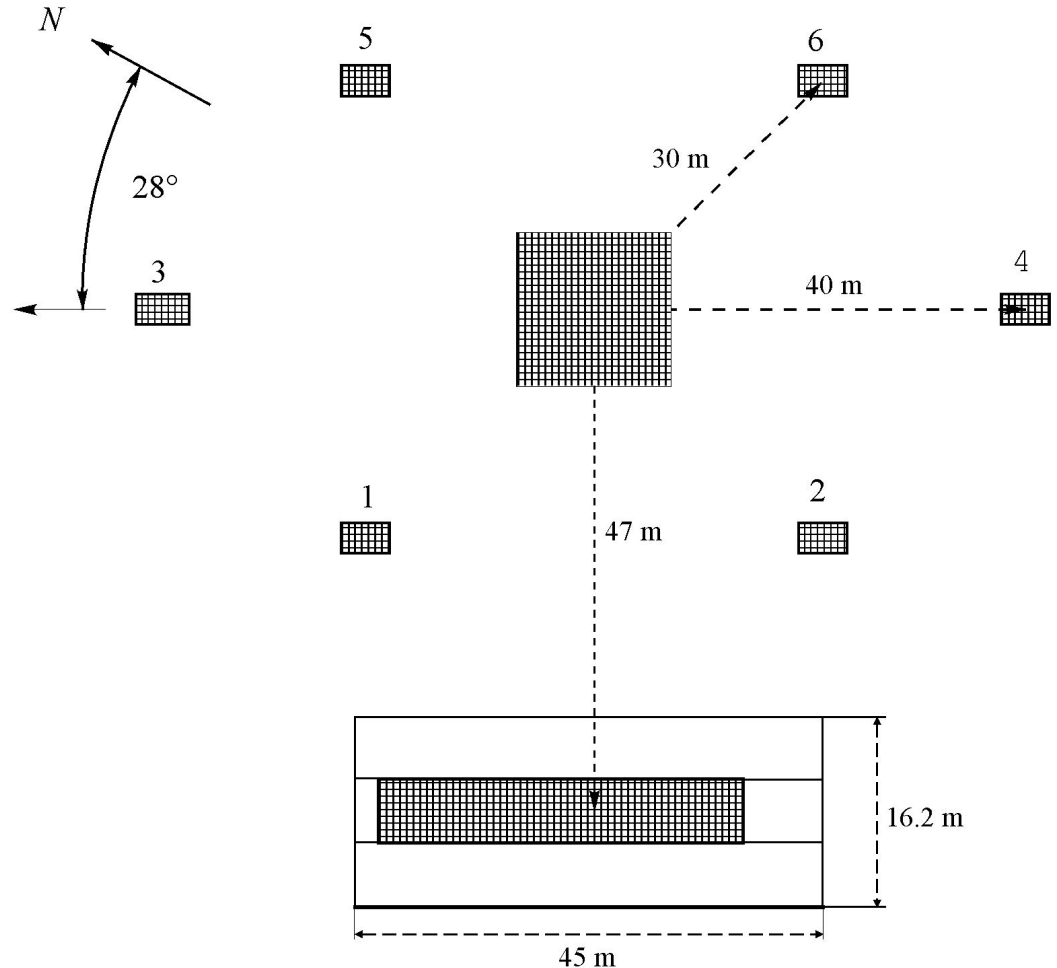
(400 жидкостных  
сцинтилляторов)

## Шесть внешних пунктов

(108 сцинтилляторов)

## Мюонный детектор

(175 пластических  
сцинтилляторов под 2 м  
скального грунта). Порог  
по энергии 1 ГэВ.



г. Андырчи

Установка  
Андырчи

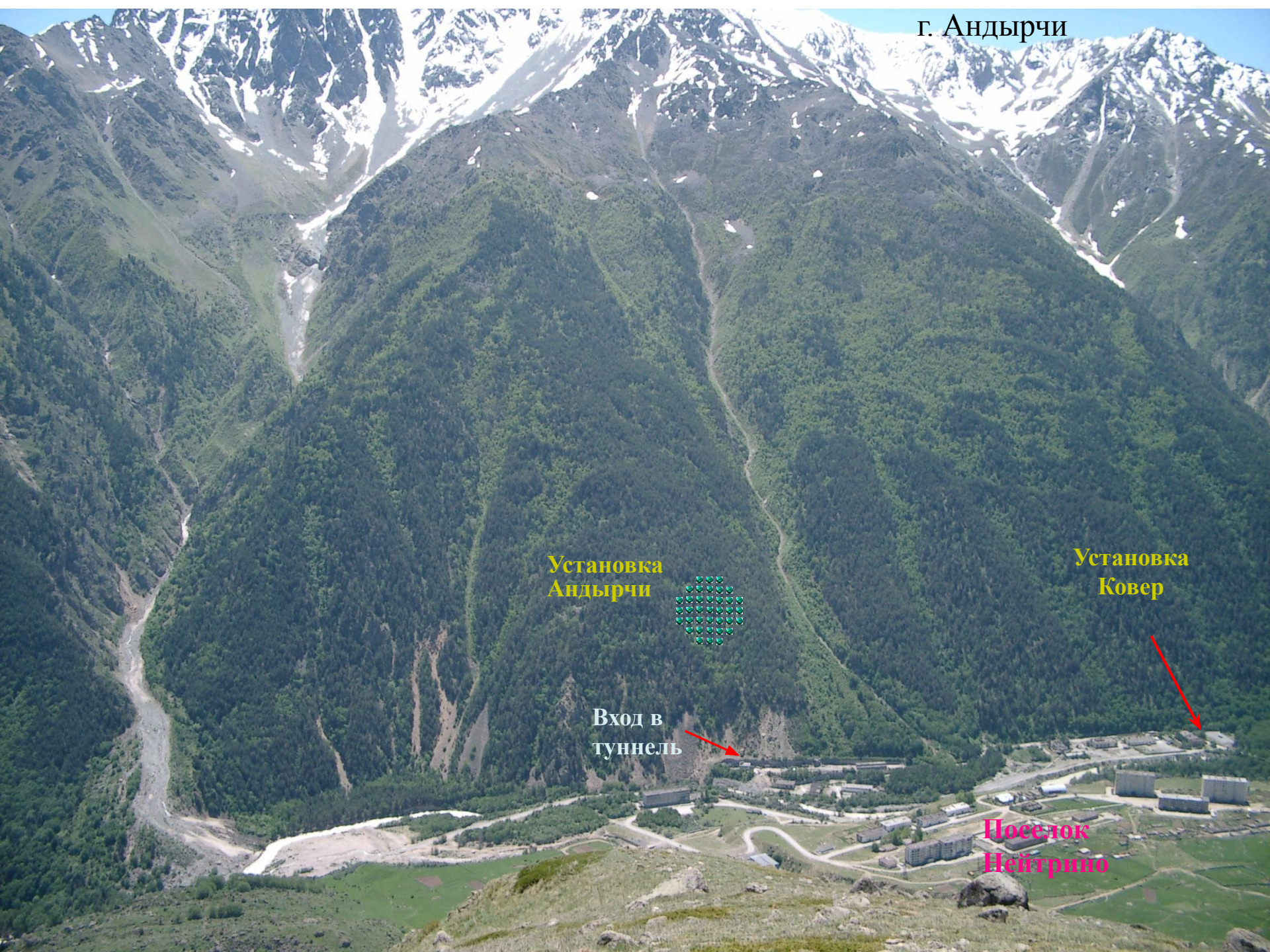


Установка  
Ковер

Вход в  
туннель



Поселок  
Шейтрино

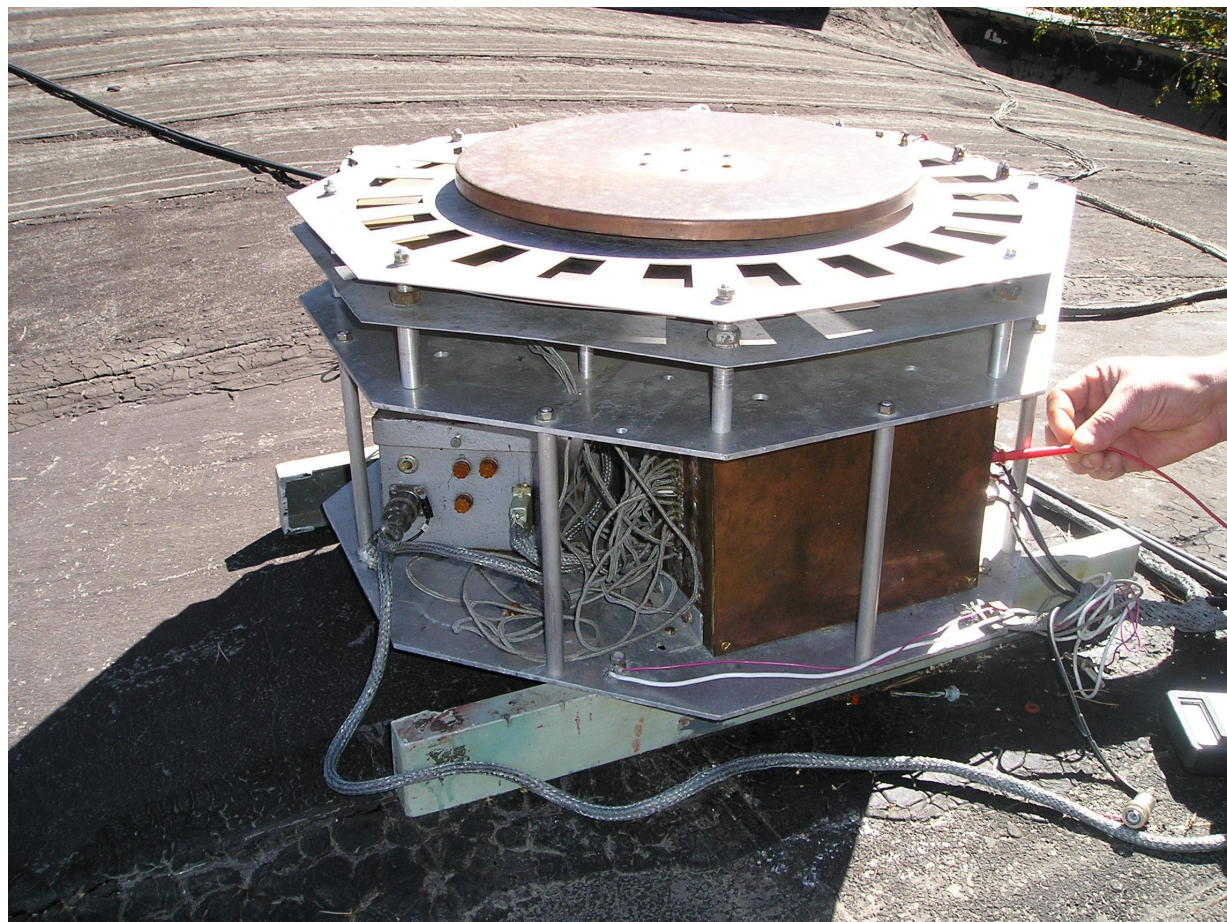


# Универсальный инструмент для измерения приземного электростатического поля атмосферы и электрического тока дождя

Измерение электростатического и медленно меняющегося поля в диапазоне от  $-40$  кВ/м до  $+40$  кВ/м с точностью  $\sim 10$  В/м.

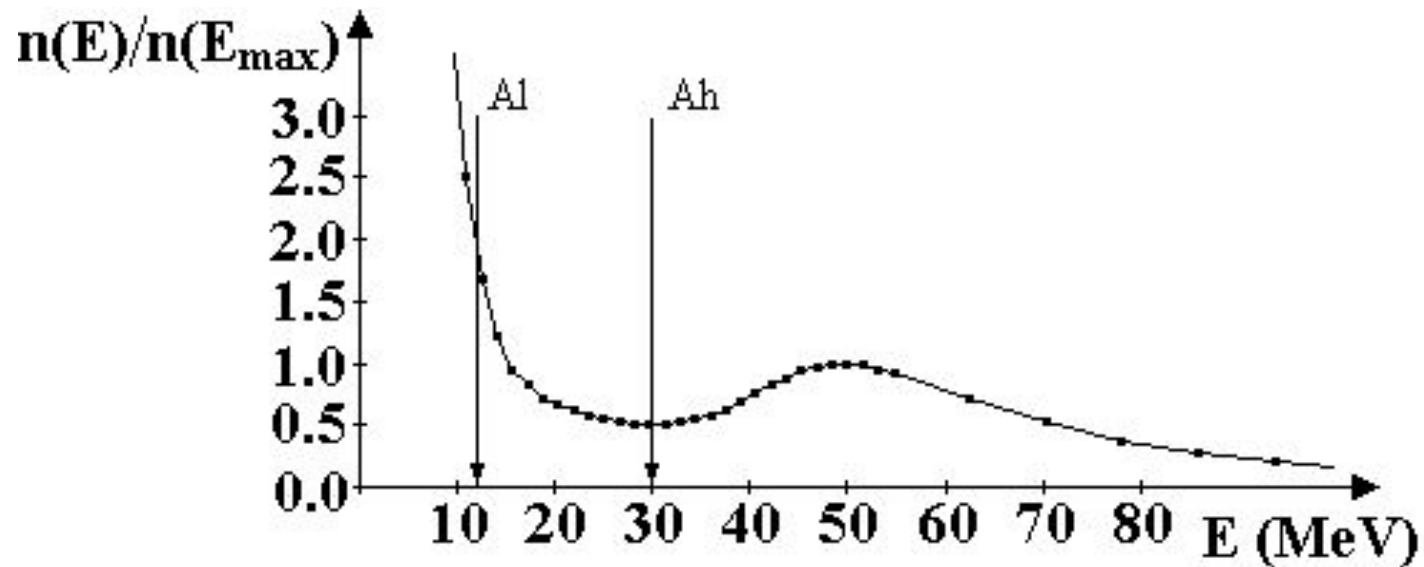
Электрический ток дождя измеряется в диапазоне от  $-50$  нА/м<sup>2</sup> до  $+50$  нА/м<sup>2</sup> с точностью  $\sim 10$  пА/м<sup>2</sup>.

Инструмент позволяет измерять не только грозовое поле, но и фоновое (поле хорошей погоды) единым методом.





# Амплитудный спектр со слоя сцинтилляторов



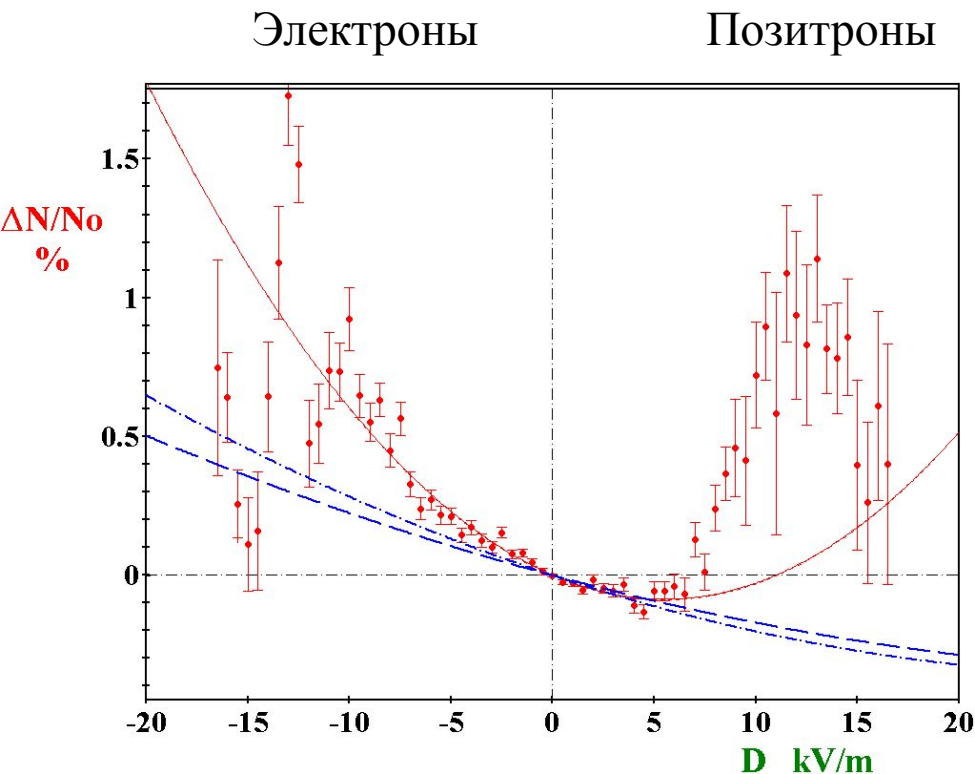
Два порога используются для разделения мягкой и жесткой компонент:

Мягкая компонента регистрируется выносными детекторами между нижним ( $A_1$ ) и верхним ( $A_h$ ) порогами. Электронов – 20%, позитронов – 10%,  $\gamma$ -квантов – 50%, примесь мюонов менее 20%.

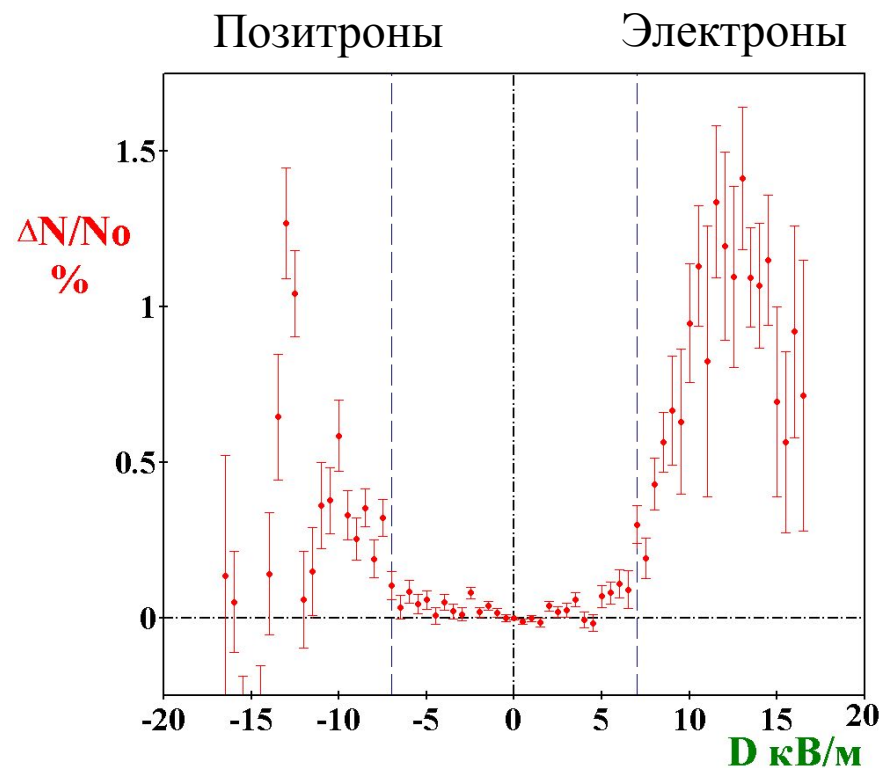
Жесткая компонента измеряется детекторами Ковра (под бетонной крышей толщиной  $29 \text{ г/см}^2$ ) выше верхнего порога (около 90% мюонов)

Корреляции интенсивности мягкой компоненты с приземным полем измеренные и рассчитанные (слева). Разница (не объясняемая трансформацией спектра в приземном поле) показана справа

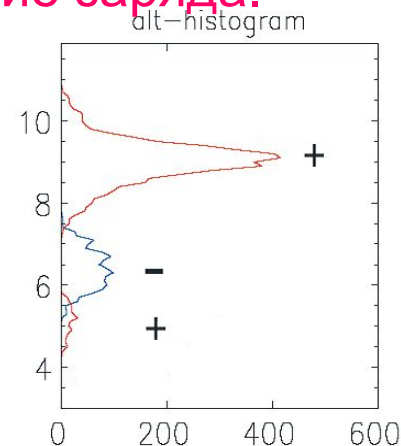
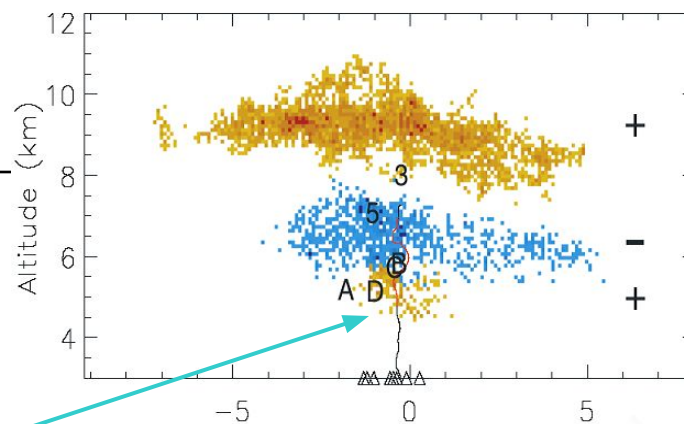
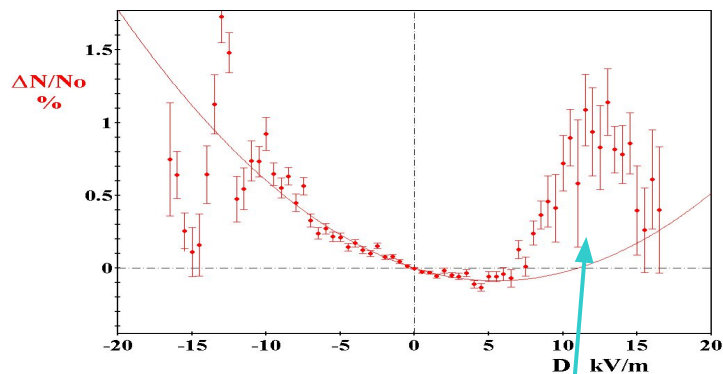
## Ускорение вблизи поверхности



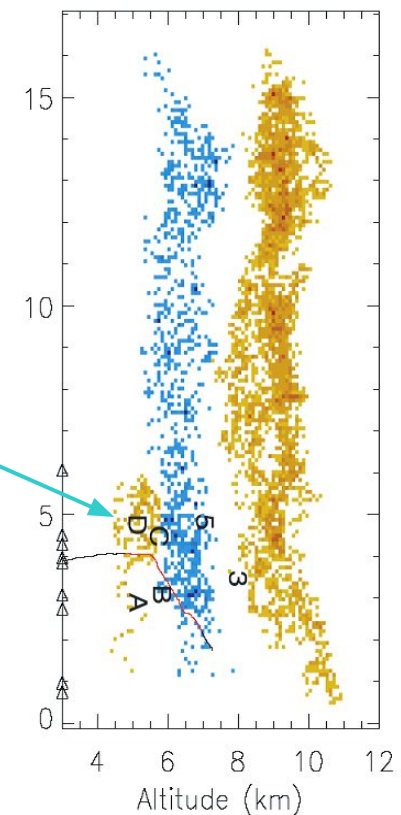
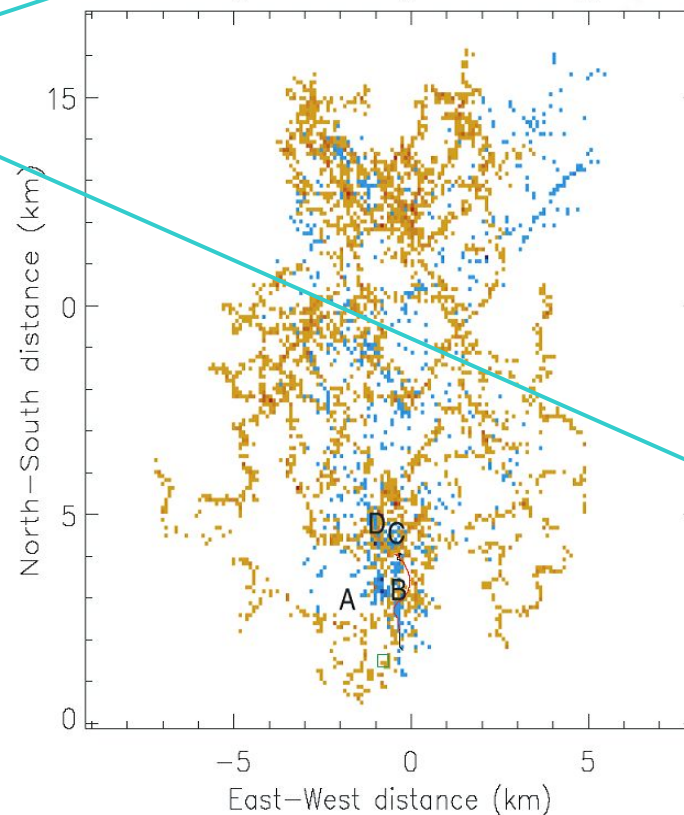
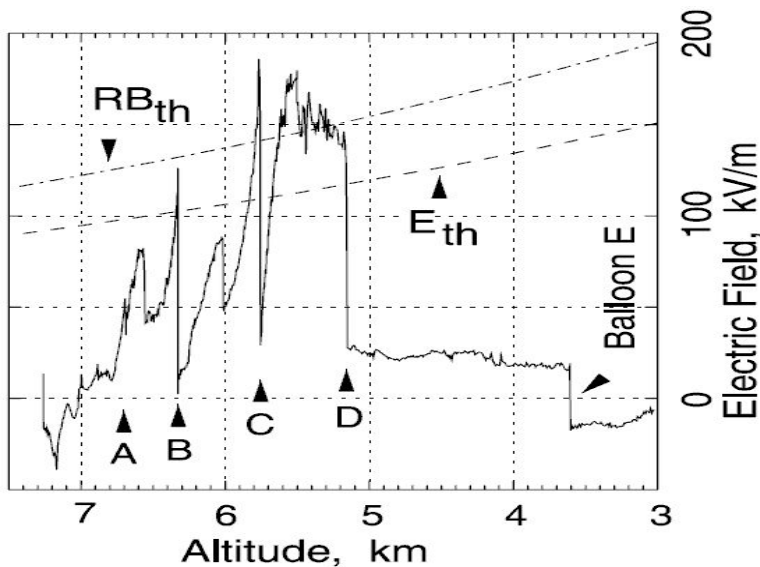
## Ускорение в облаках



# Гроза 31 июля 1999 (Marshall et al., 2005). Распределение заряда.

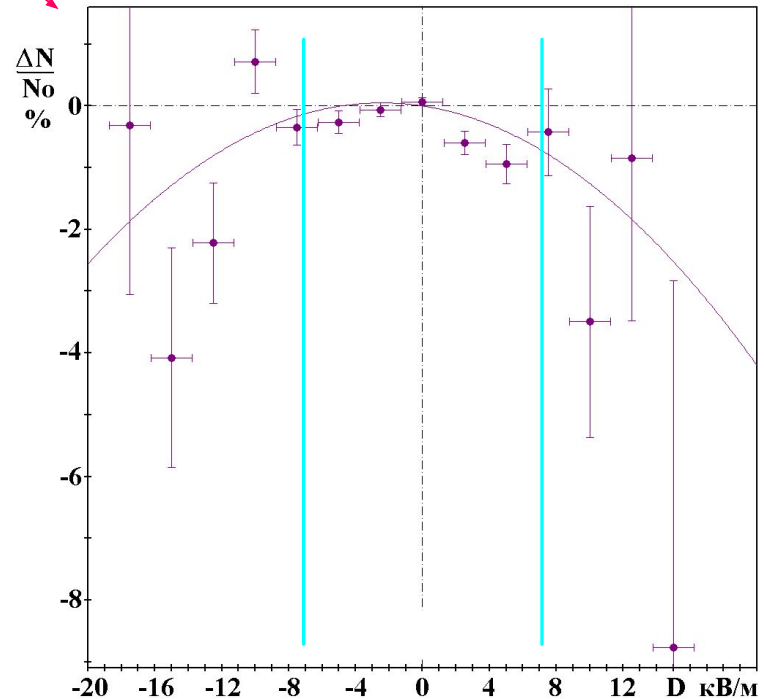
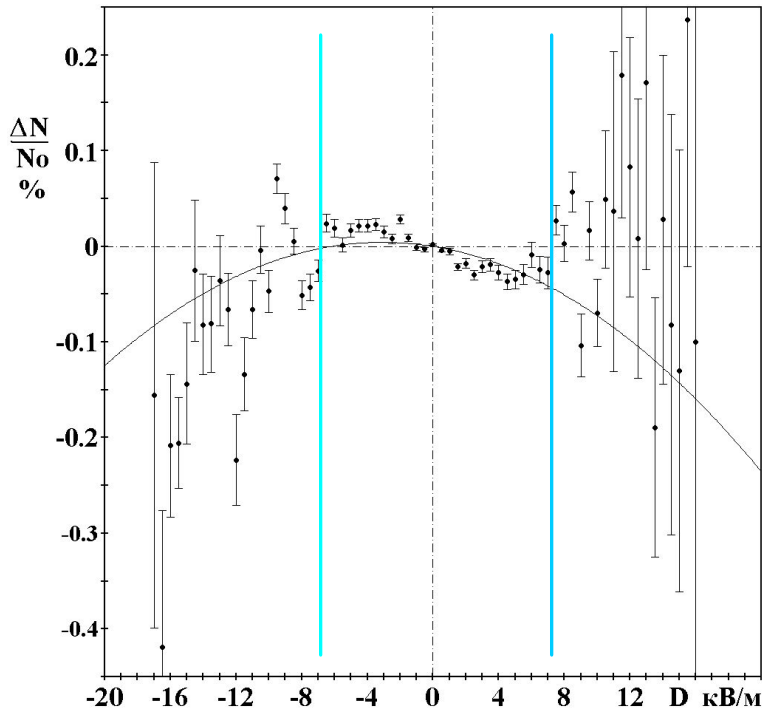
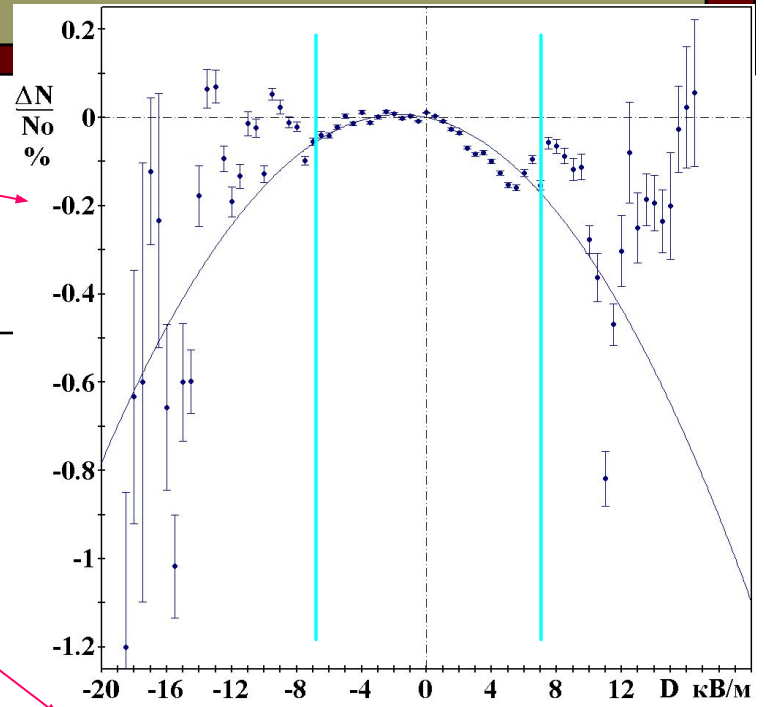


Положительный заряд  
экранирует сильное  
отрицательное поле



Мюоны  $E_\mu > 100$  МэВ  
Останавливающиеся мюоны  
( $15 < E_\mu < 90$  МэВ)

Мюоны  $E_\mu > 1$  ГэВ



# Различные типы ярких событий

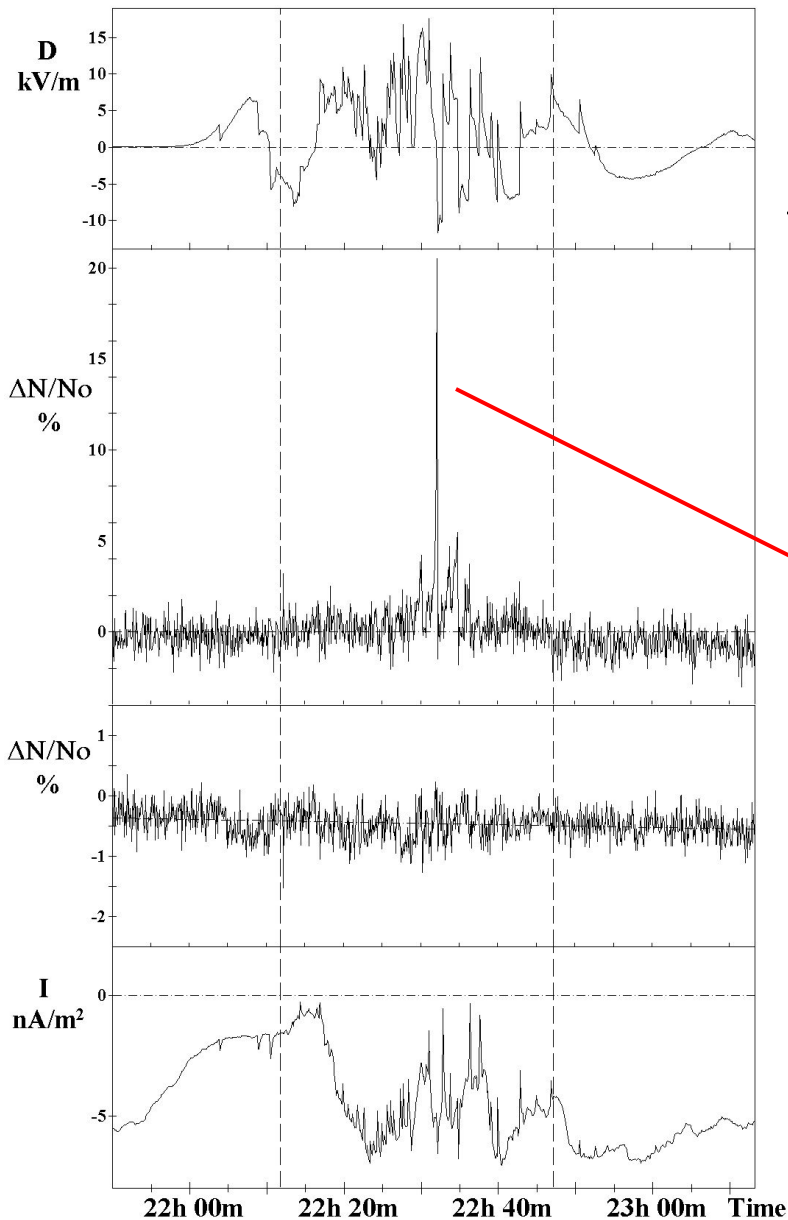
---

- Предмолниевые возрастания
- Возрастания без молниевых эффектов
- Возрастания мягкой компоненты без мюонных эффектов
- Возрастания мягкой компоненты с мюонными возмущениями разной полярности
- Коррелирующие с приземным полем
- Коррелирующие с электрическим током дождя
- Сопровождающиеся магнитными пульсациями

Коэффициенты аппроксимации полиномами второй степени кривых регрессии интенсивность –поле для разных компонент

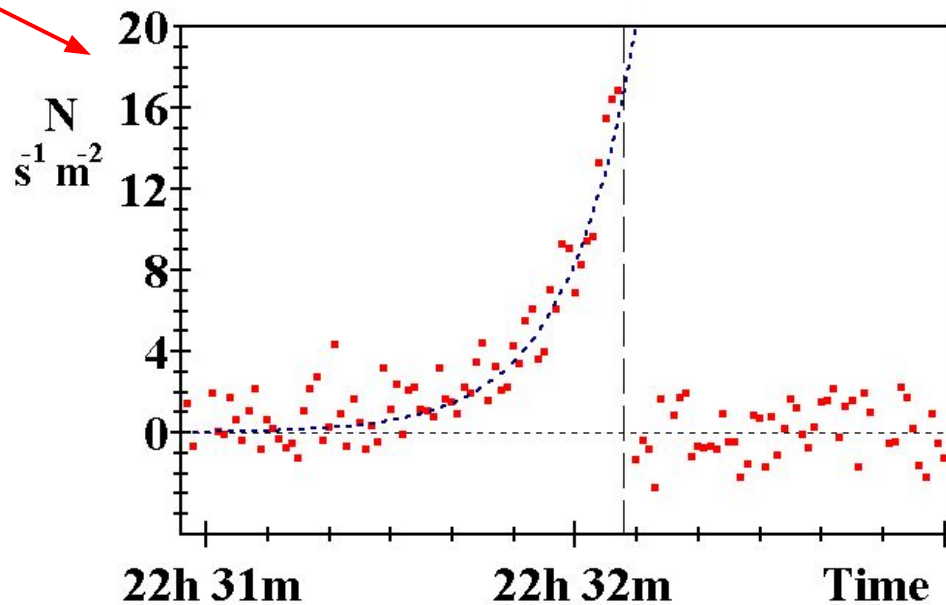
---

Компонента	Энергия	Линейный коэффициент, %/кВ/м	Квадратичный коэффициент, % / (кВ/м) <sup>2</sup>
Мюоны	> 1 ГэВ	– 0.00277 ± 0.00034	– 0.00045 ± 0.00005
Жесткая компонента (мюоны)	> 100 МэВ	– 0.00794 ± 0.0013	– 0.00235 ± 0.00002
Останавливающиеся мюоны	20 – 80 МэВ	– 0.04124 ± 0.01260	– 0.00845 ± 0.00201

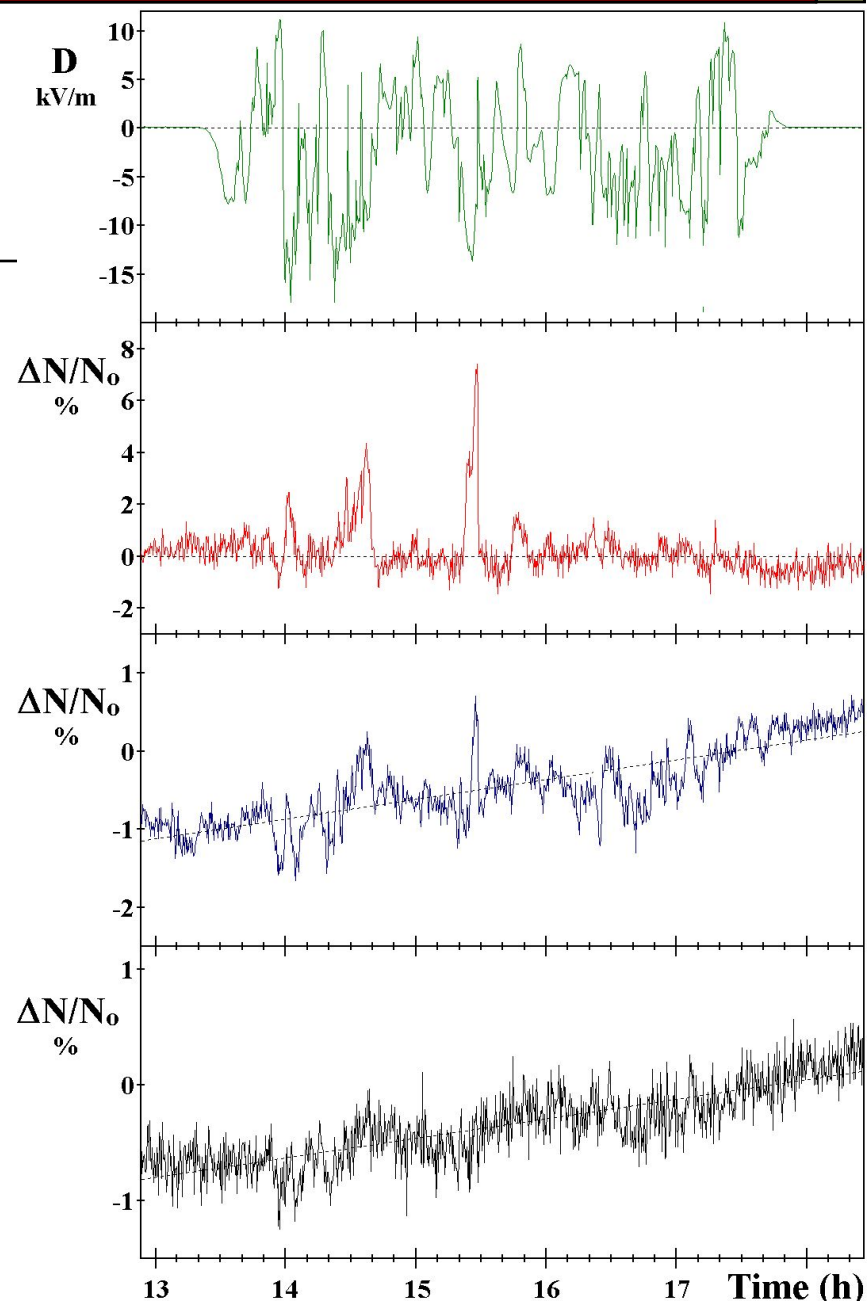
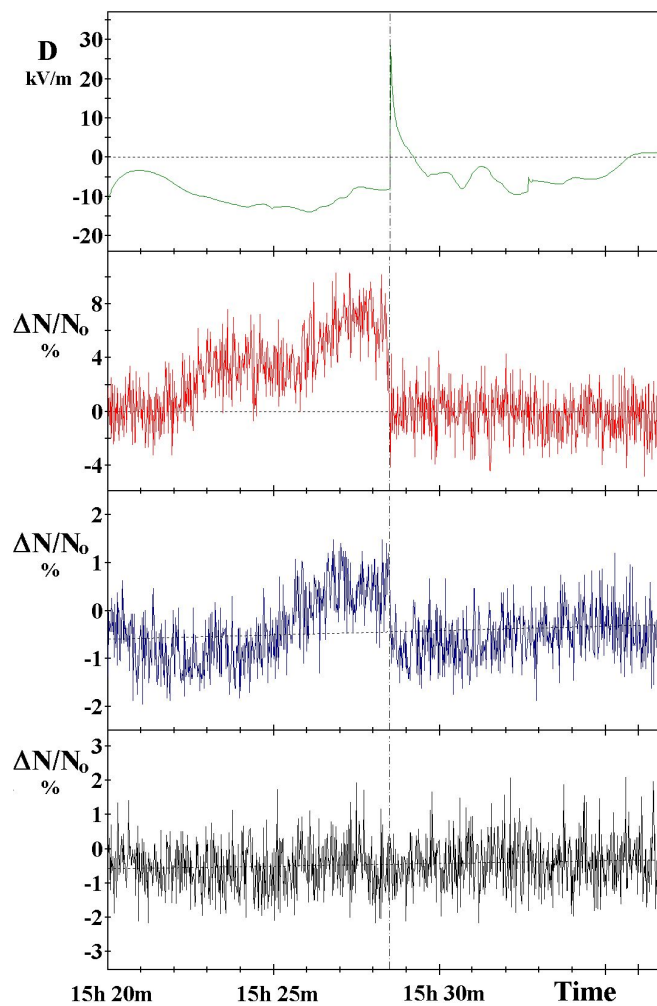


## Событие 7 сент. 2000 г.

Наибольшее возрастание с высокой точностью экспоненциально и имеет резкий обрыв в момент молнии



# Гроза 26 сент. 2001 г. в Баксанском ущелье

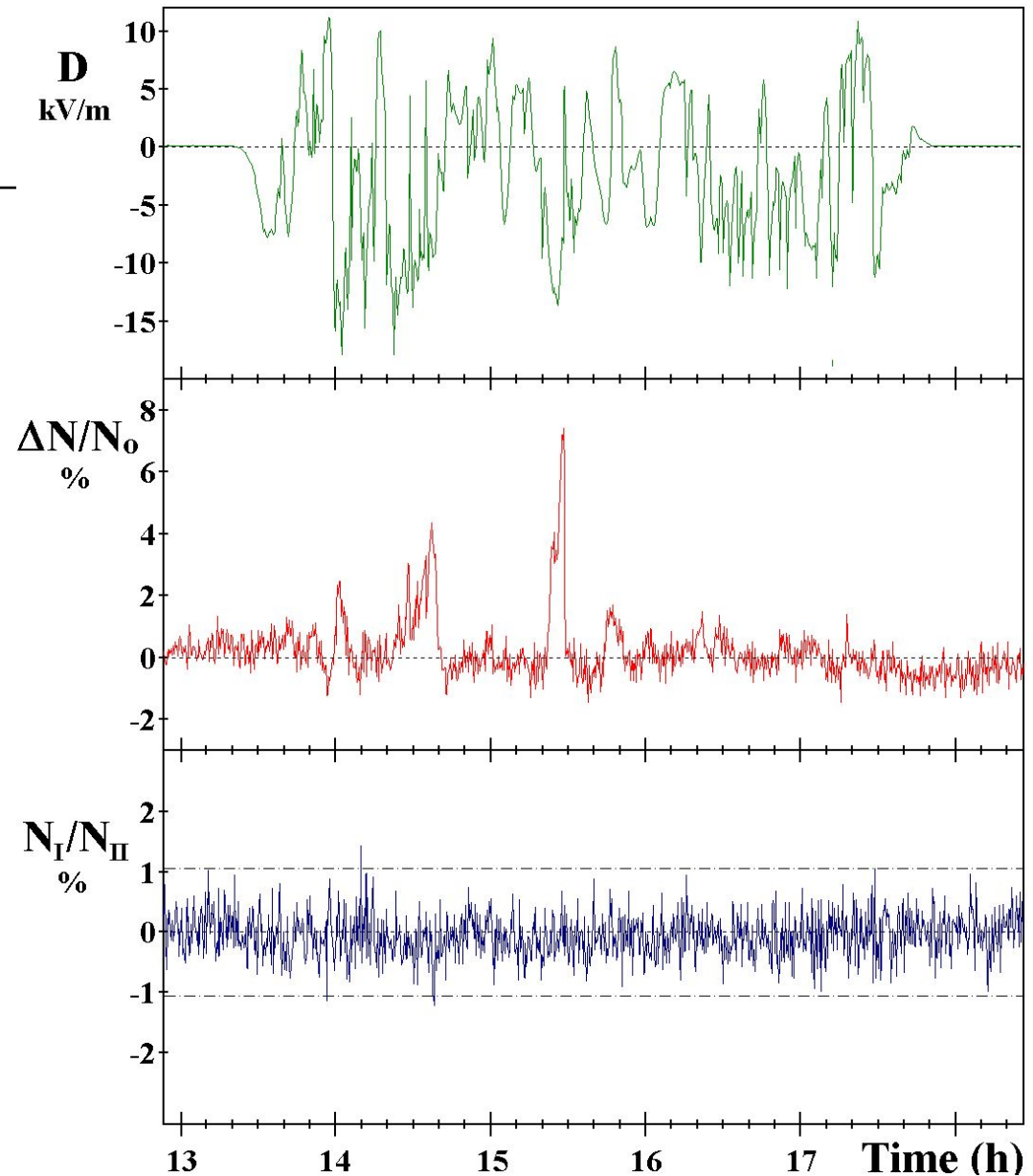




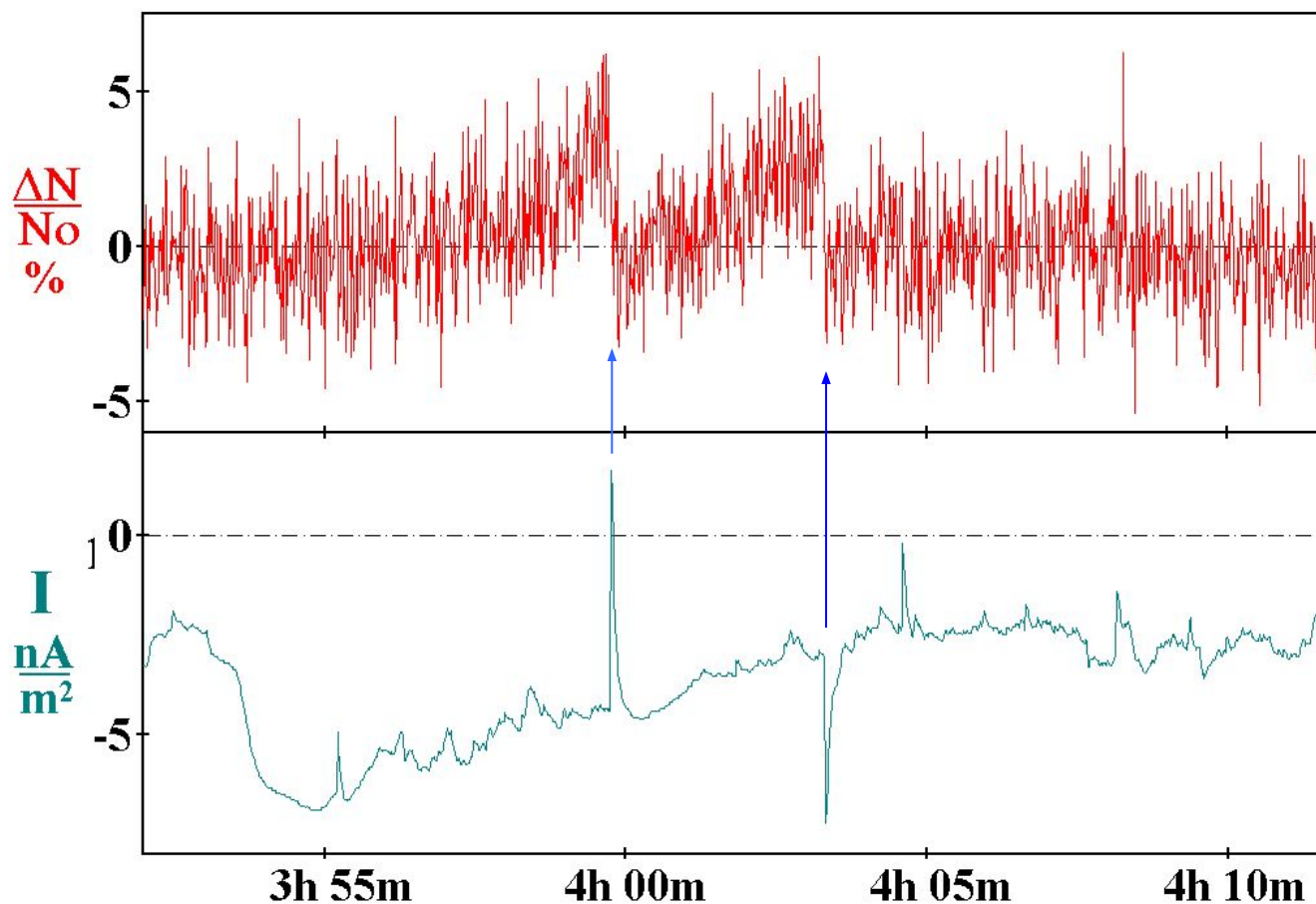
## Гроза 26 сент. 2001 г.

Темп счета детекторов  
мягкой компоненты

Отношение темпов счета двух  
половин детектора мягкой  
компоненты показывает чисто  
статистическое поведение.  
Штриховые линии показывают  
уровень трех стандартных  
отклонений.

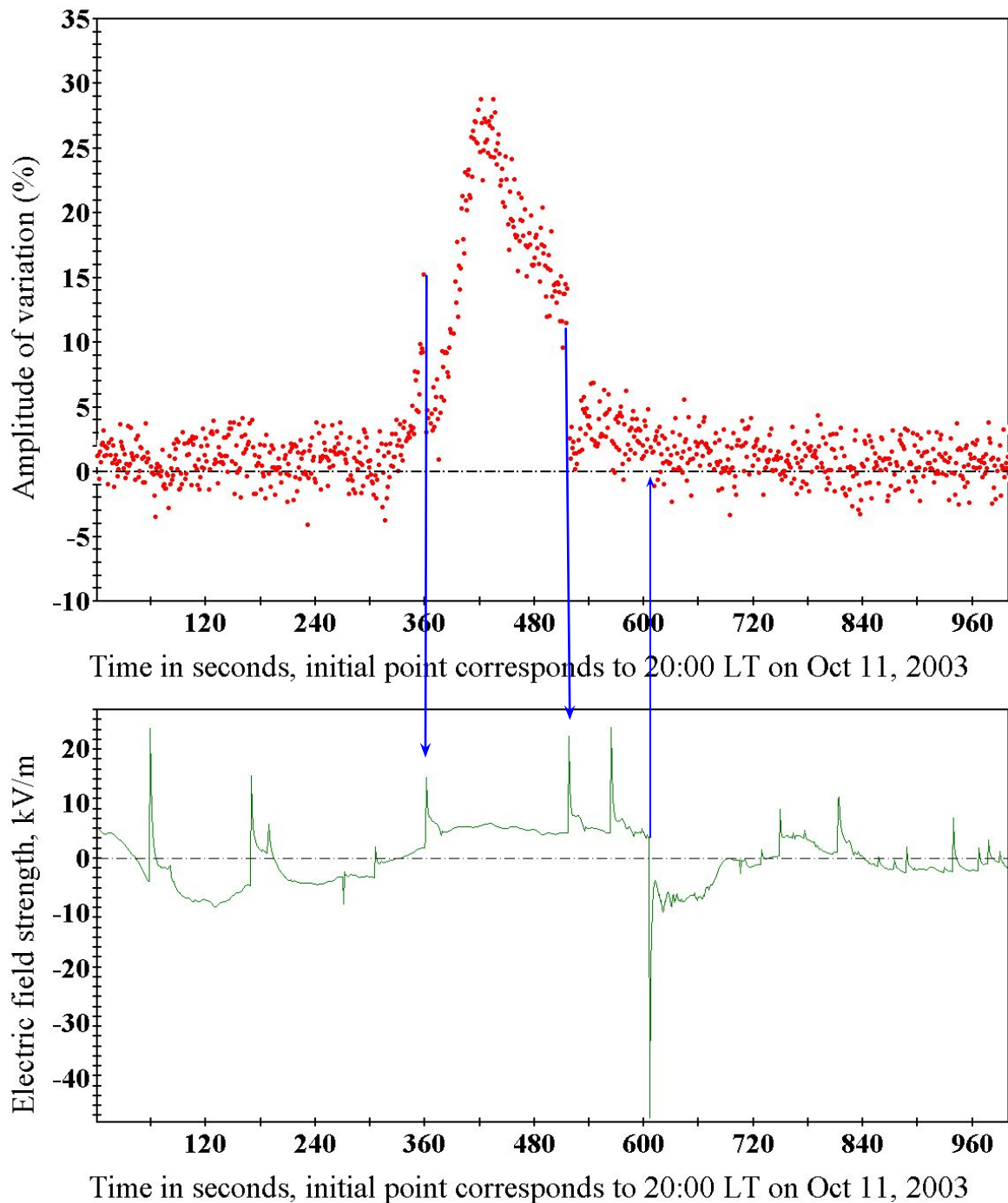


Два разряда молний разной полярности производящие одинаковый эффект во время грозы 1 августа 2008 г.

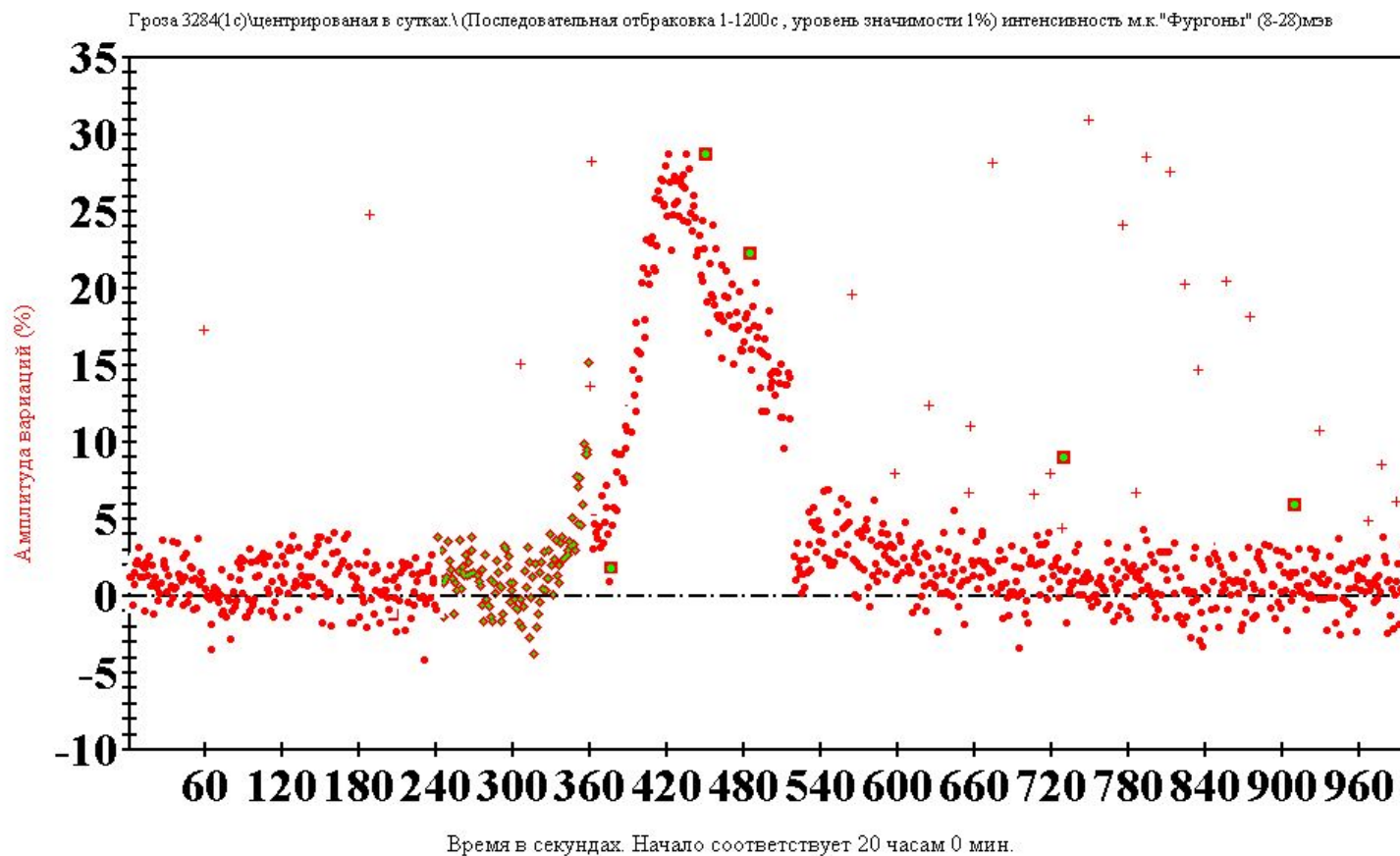


Рекордное возрастание  
мягкой компоненты 11  
октября 2003 г.

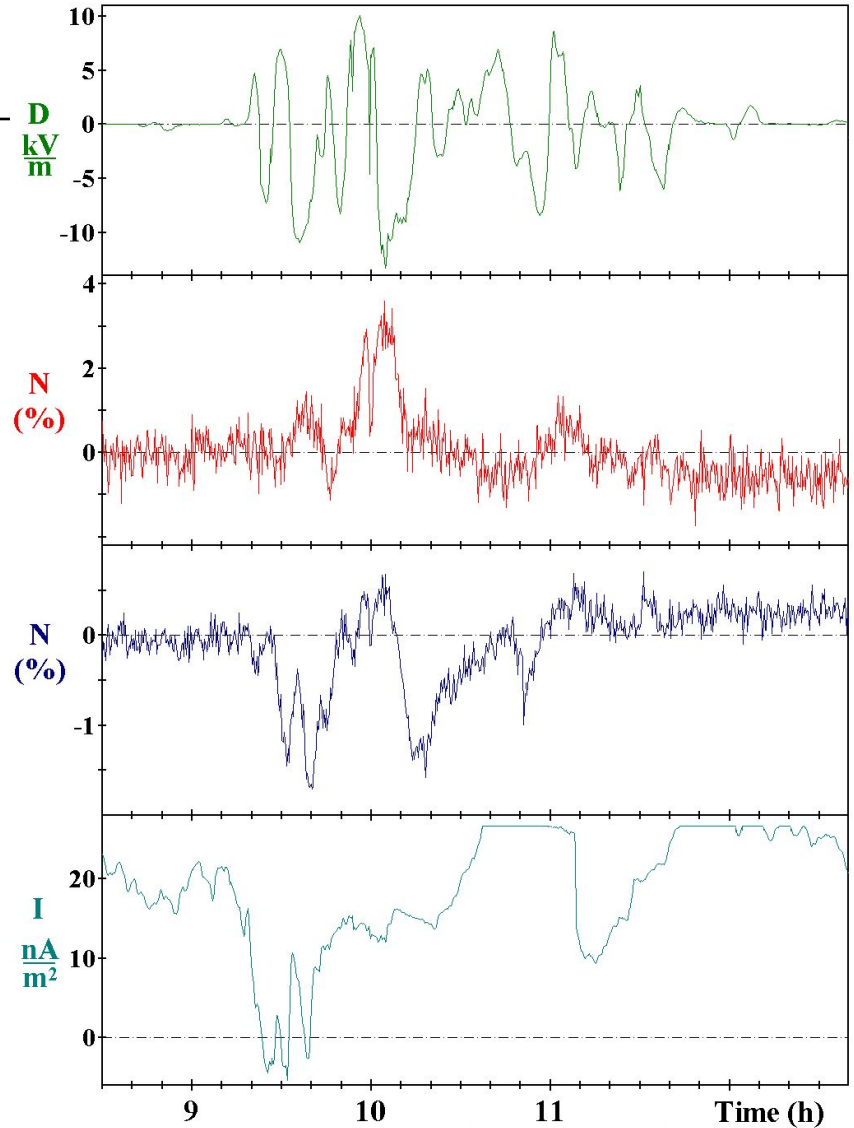
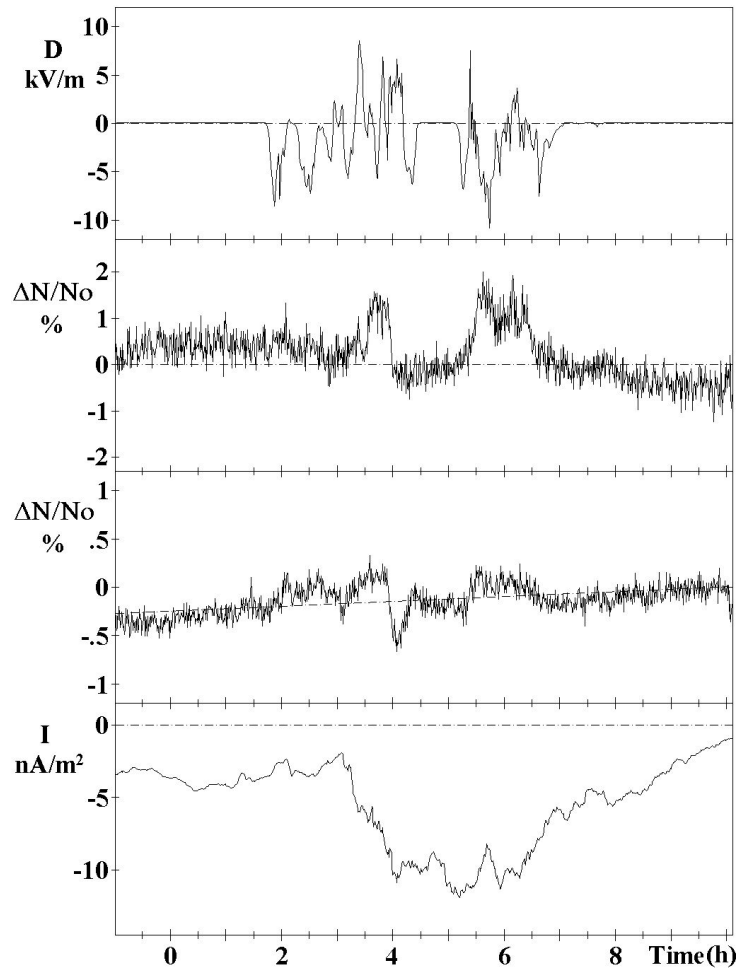
Оценка минимального  
расстояния до двух  
молний оказывающих  
сильное влияние на  
интенсивность дает  
4.4 и 3.1 км. Другие  
разряды, включая очень  
близкие, не дают  
никакого эффекта.



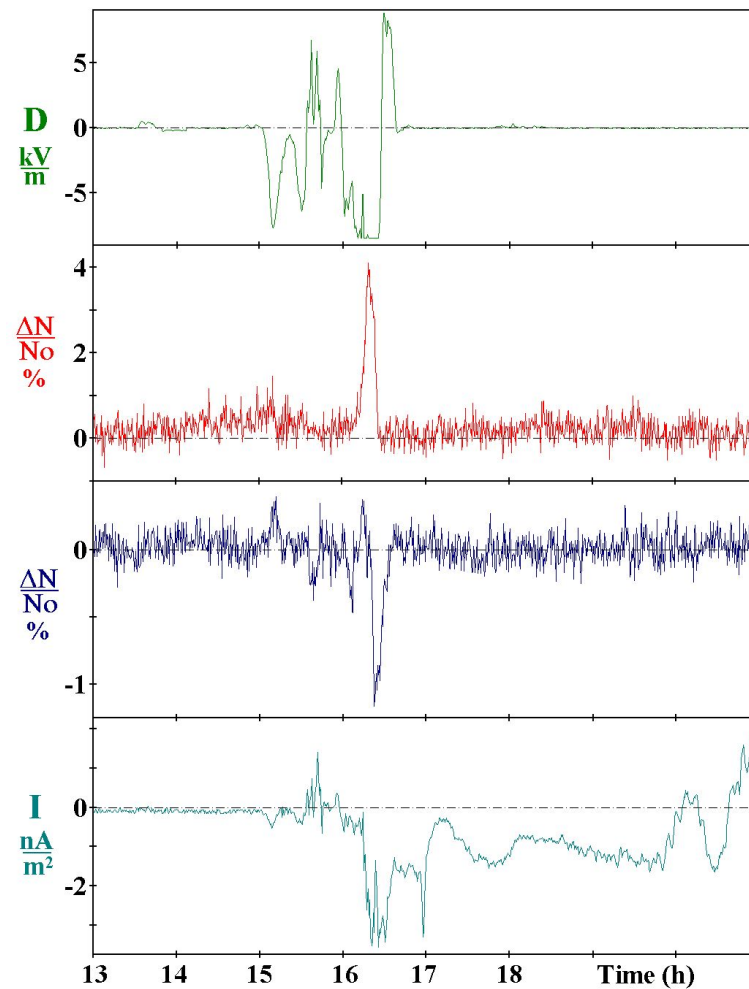
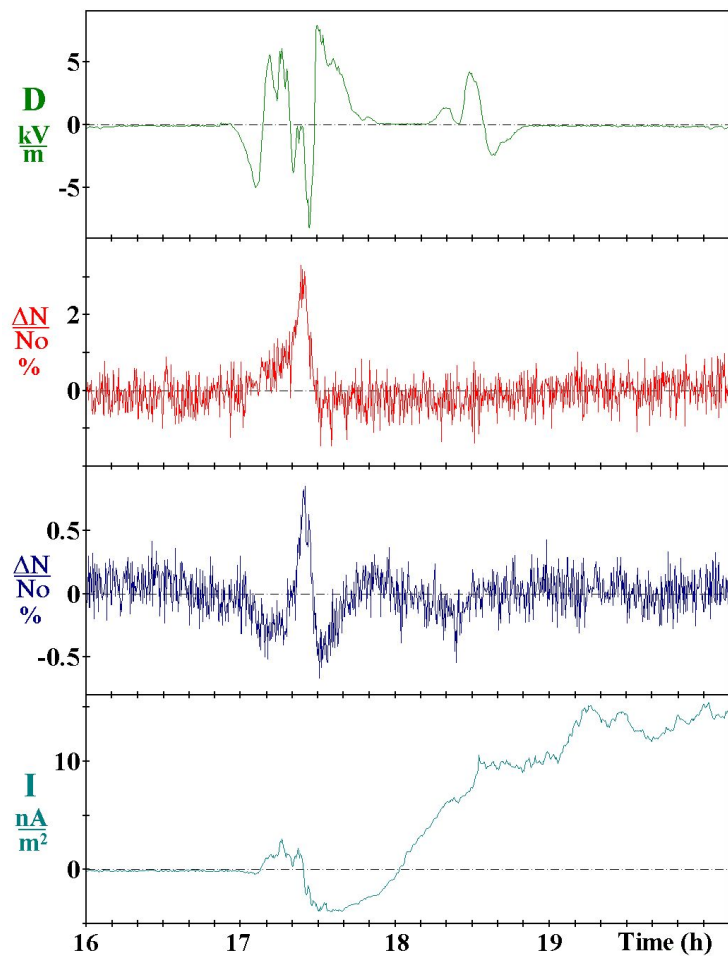
# Событие 11 октября 2003 г. до исключения секундных интервалов совпадающими с сигналами шумового канала и не прошедших критерия однородности



Грозы 26 сентября 2000 г.  
(1T – 40 с) и 6 сентября 2005 г.  
(1T – 20 с)

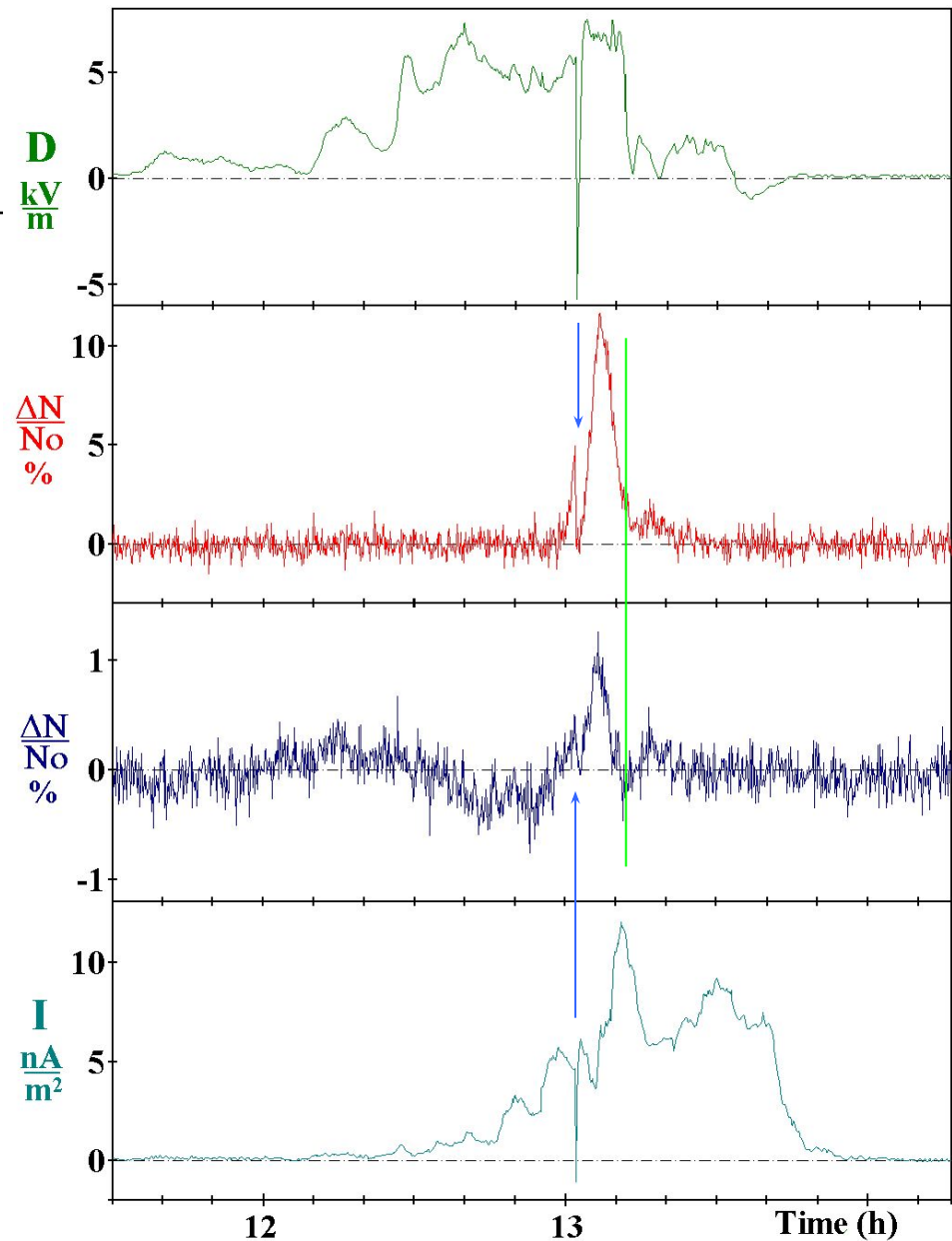


События 18 июня 2008 г. (слева, усреднение по 15 с) и 18 июля 2008 г. (справа, усреднение по 30 с)



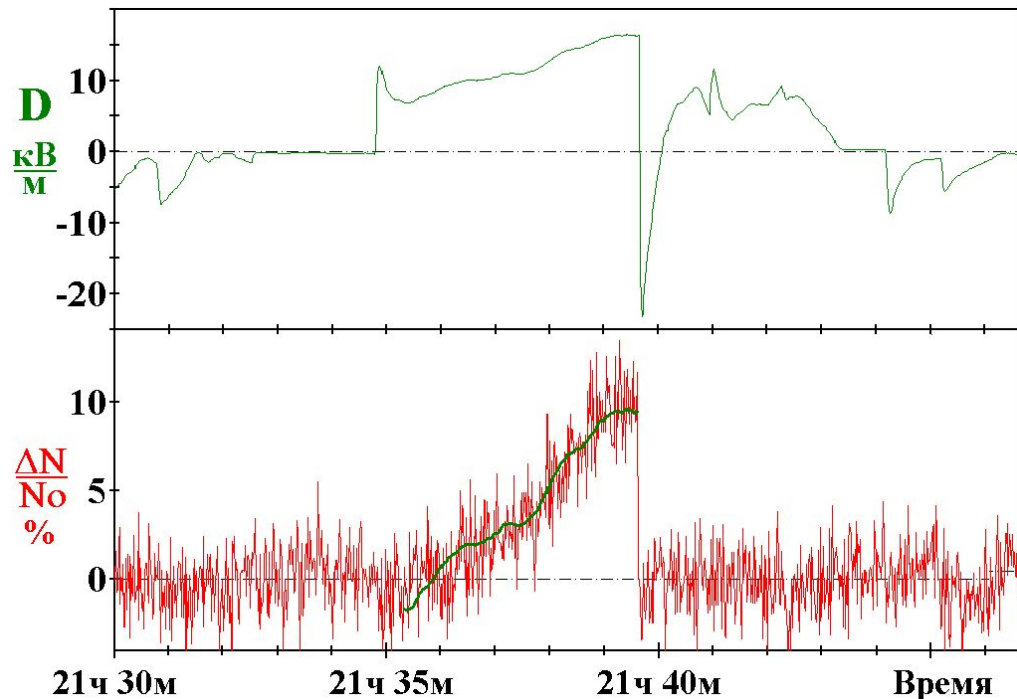
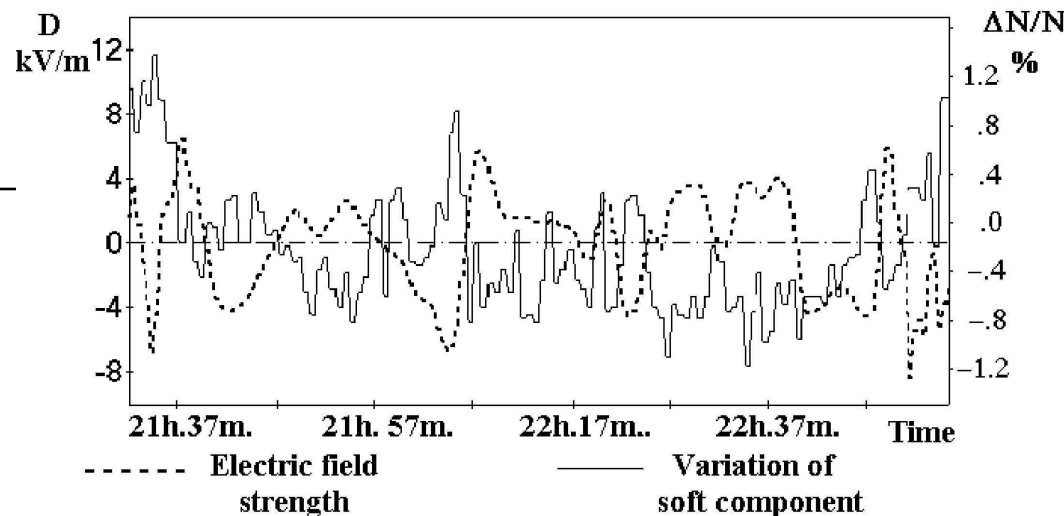
## Событие 11 сентября 2005 г. (усреднение по 10 с)

В этом событии разряд молнии вызывает скачки интенсивности как мягкой, так и жесткой компонент. Автокорреляция с электрическим током дождя. Время задержки 260 с.



## Корреляция мягкой компоненты с полем

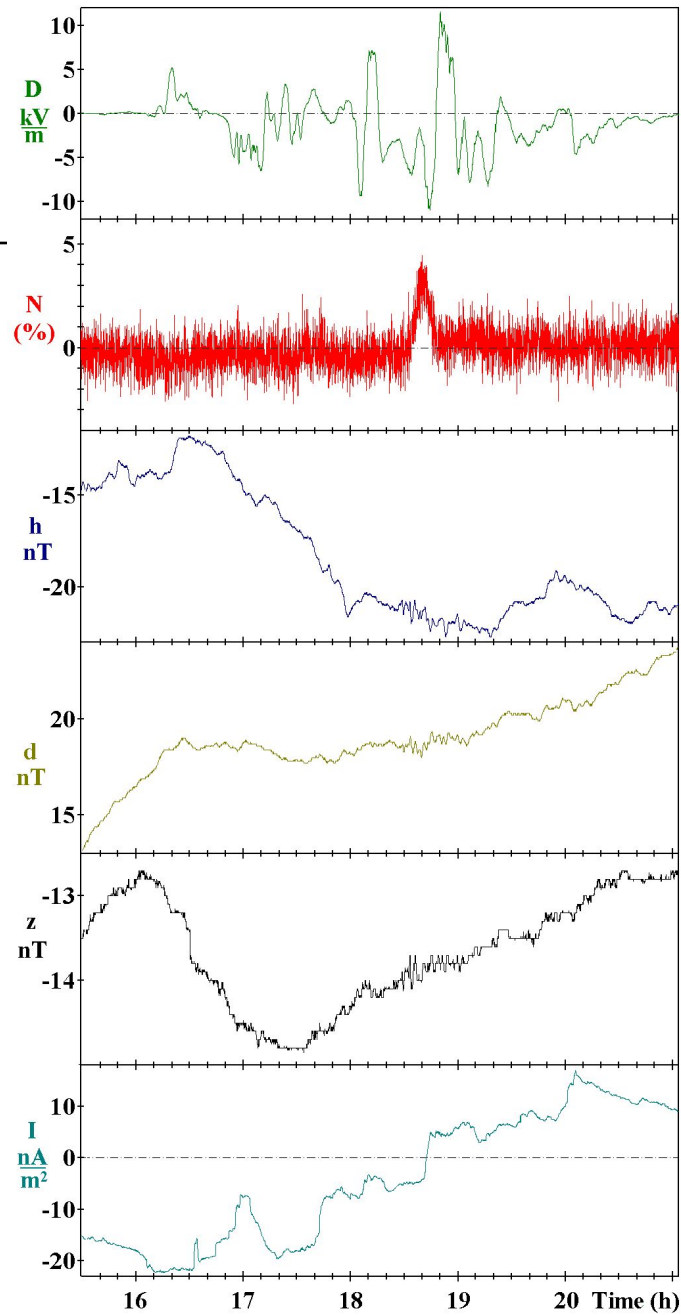
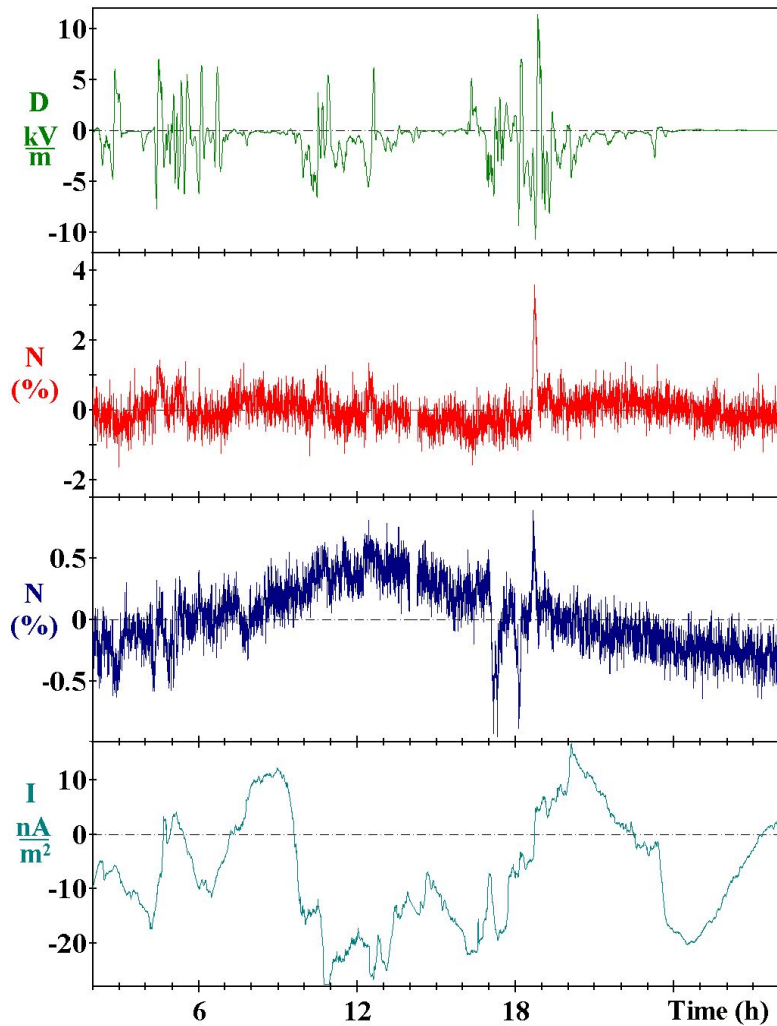
Пример отрицательной корреляции  
электрического поля и мягкой  
компоненты, событие 7 сентября  
2000 г. Интервал усреднения 80 с.



Предмолниевое  
возрастание. Событие 3  
сен. 2006 г. (1т – 1с)



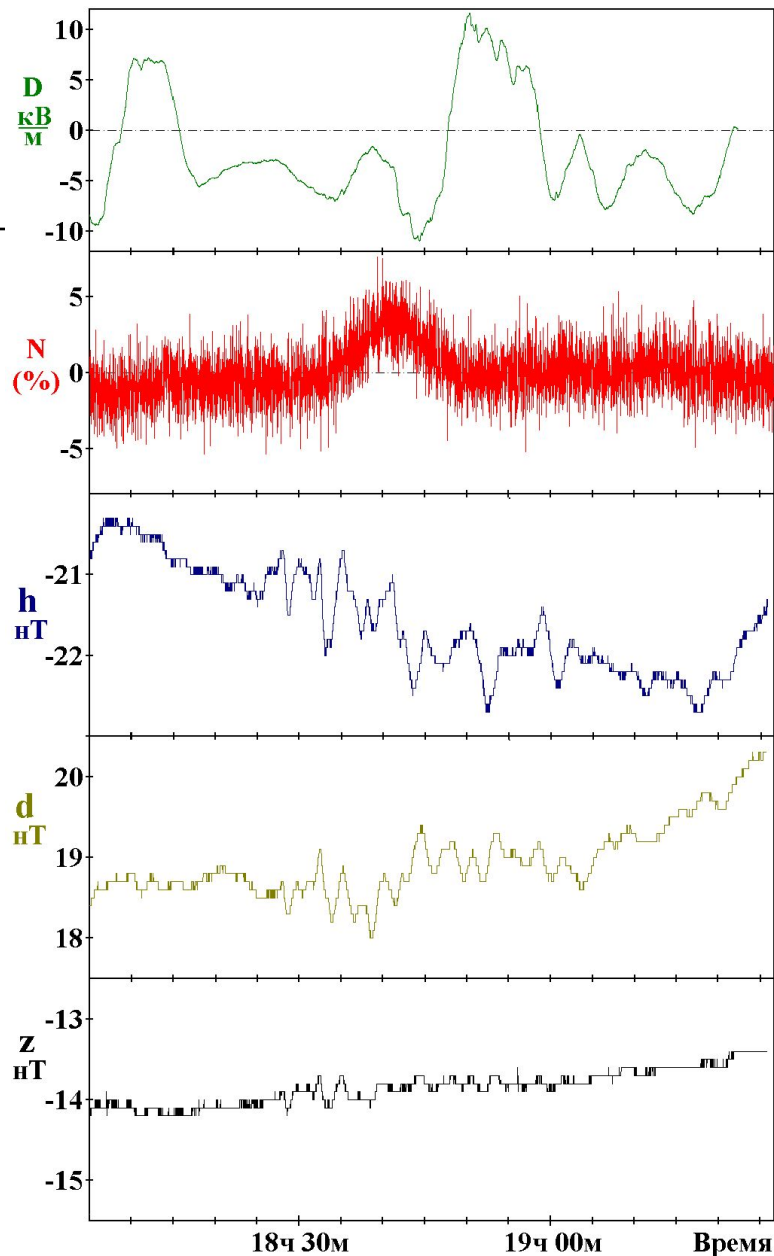
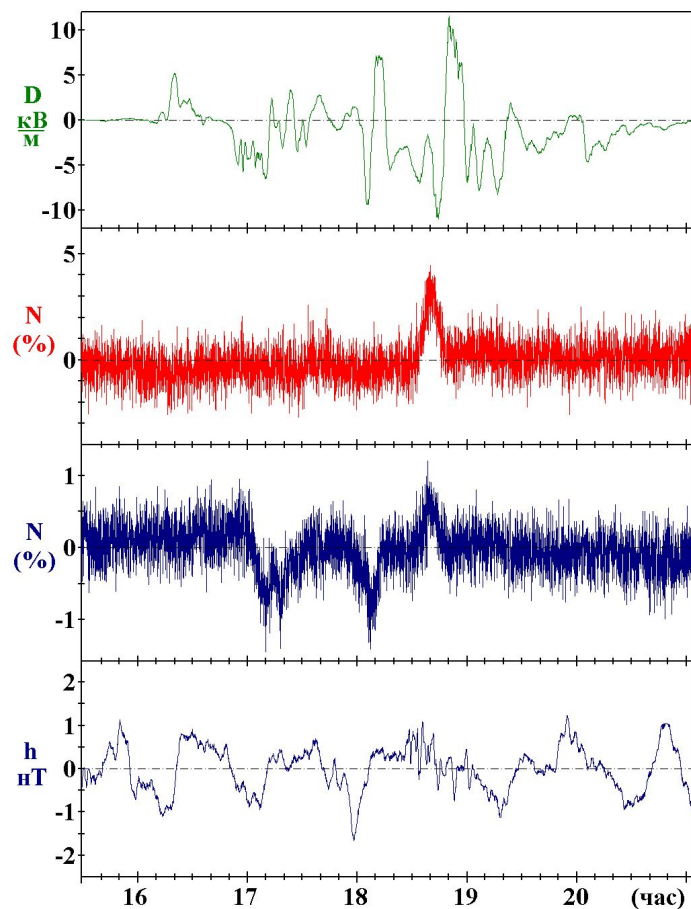
# Грозы 15 октября 2007 г. (усреднение данных по 20 с и 4 с).



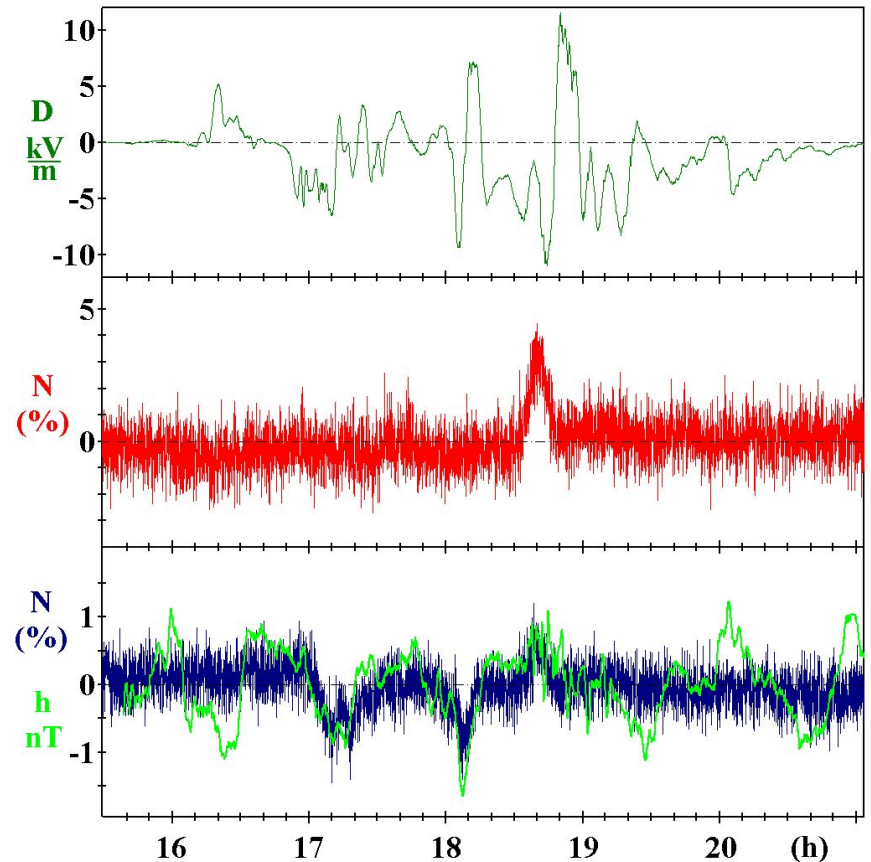
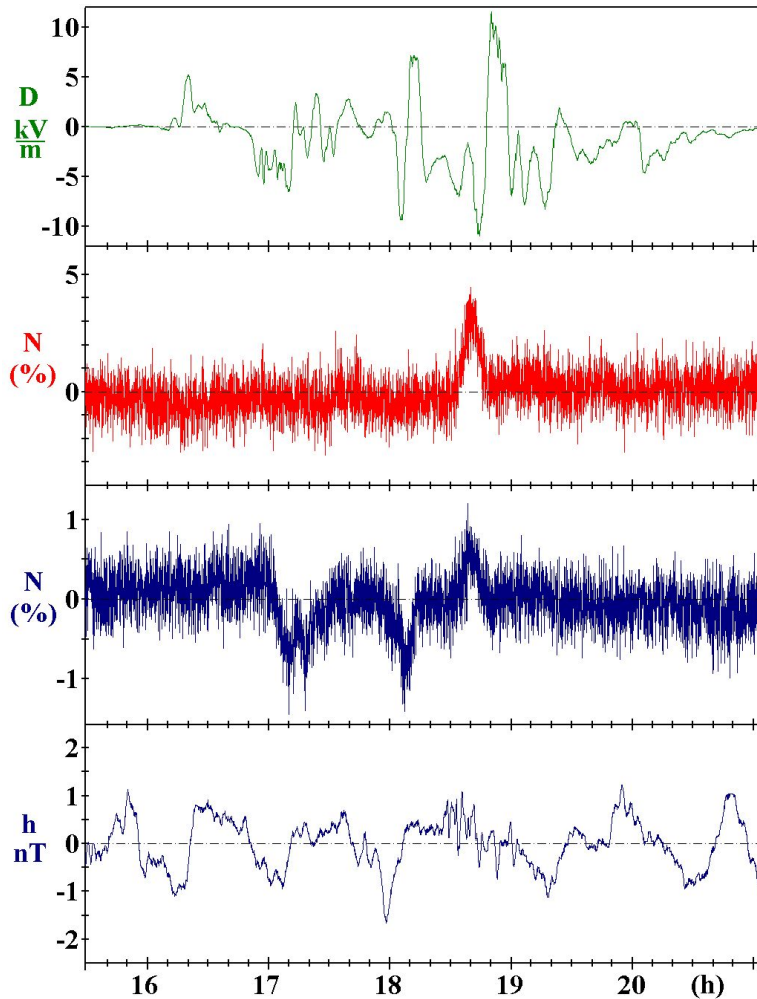
Северокавказская геофизическая обсерватория, Лаборатория  
№ 1 Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта



Событие 15 октября 2007 г.  
Из графика  $h$ -компоненты вычтена суточная волна (внизу). Справа данные с наилучшим временным разрешением (1 с).



Событие 15 октября 2007 г.: сложная вариация мюонов повторяет поведение  $h$ -компоненты геомагнитного поля (с вычтенной суточной волной) со временем задержки 9 мин



# Событие 15 октября 2007 г.

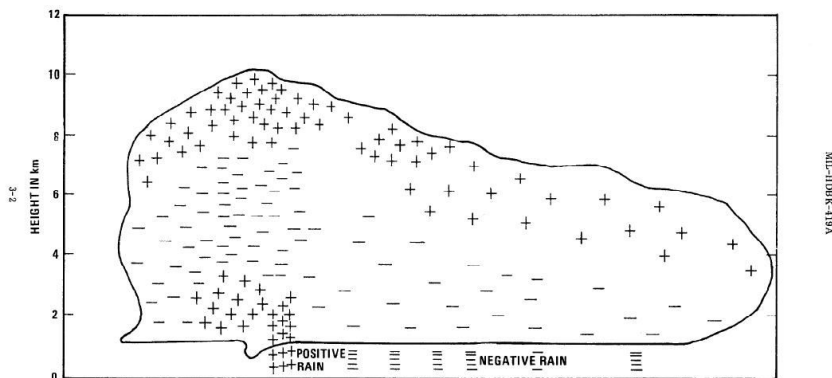
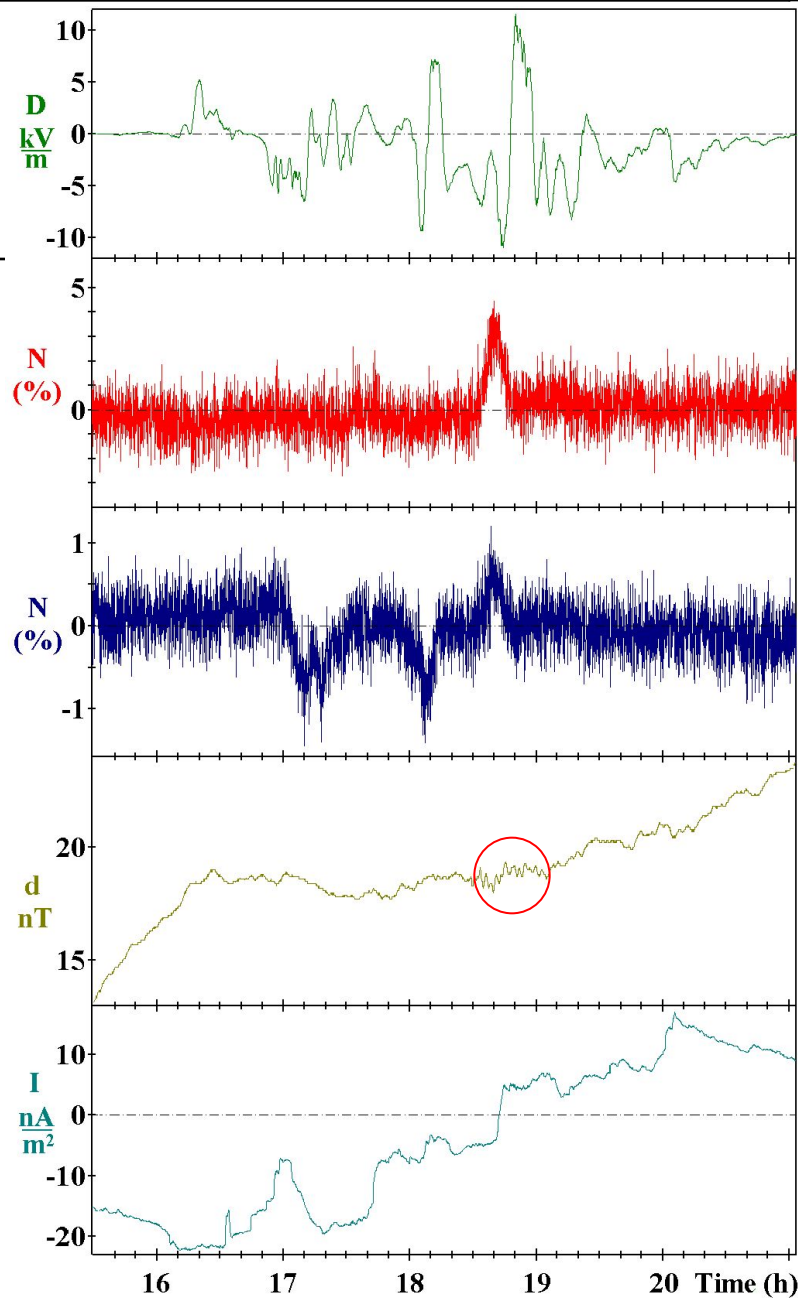
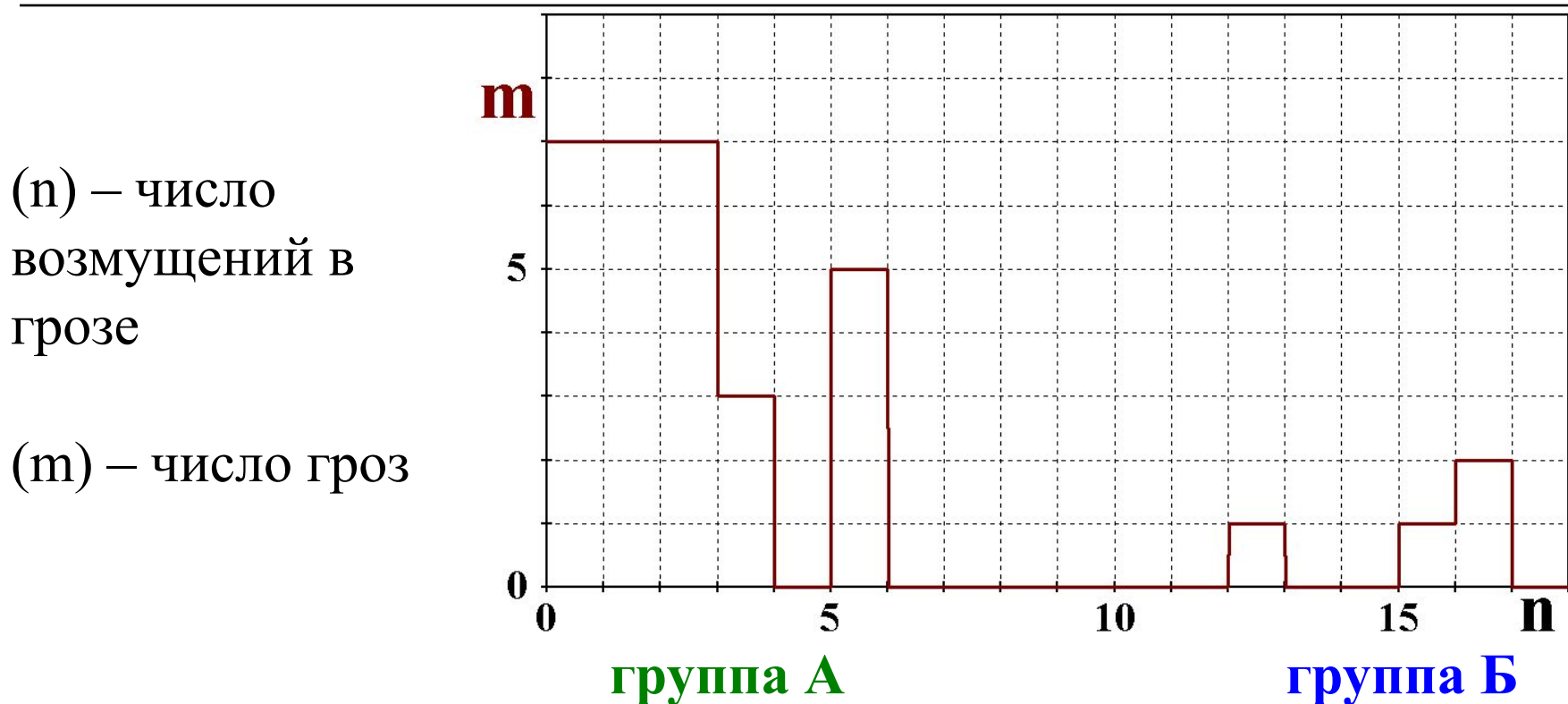


Figure 3-1. Charge Distribution in a Thundercloud

<i>P<sub>c</sub></i>	<i>Period, s</i>	<i>P<sub>i</sub></i>	<i>Period, s</i>
<b>P<sub>c1</sub></b>	0,2 - 5	P <sub>i</sub> 1	1 - 40
P <sub>c</sub> 2	5 - 10	P <sub>i</sub> 2	40 - 150
P <sub>c</sub> 3	10 - 45	P <sub>i</sub> 3	100 - 300
P <sub>c</sub> 4	45 - 150		
P <sub>c</sub> 5	150 - 600		



Распределение гроз по числу значимых (более 0.2%) возмущений интенсивности мюонов. Данные 33 гроз в летний сезон 2008 г.

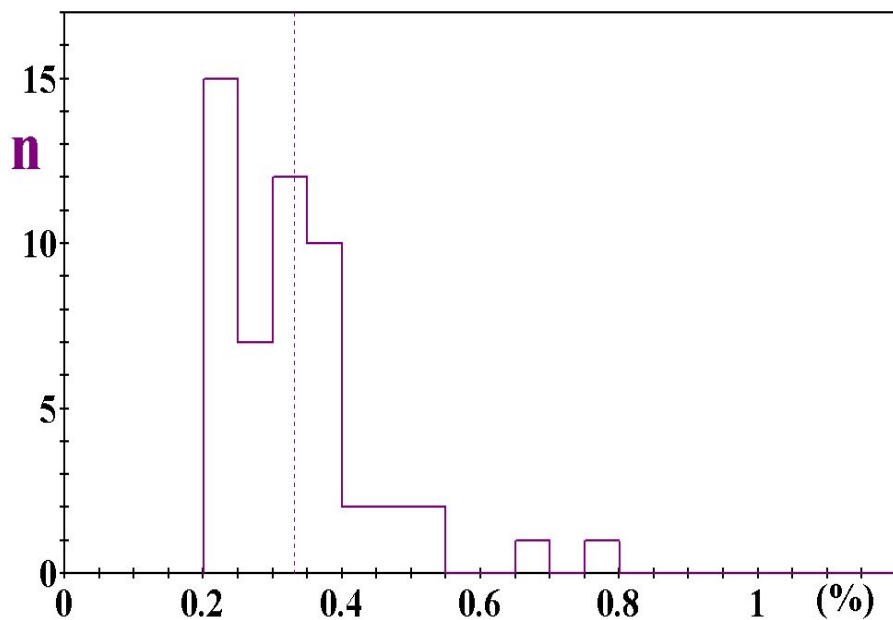


Отношение числа отрицательных и положительных возмущений в разных группах:

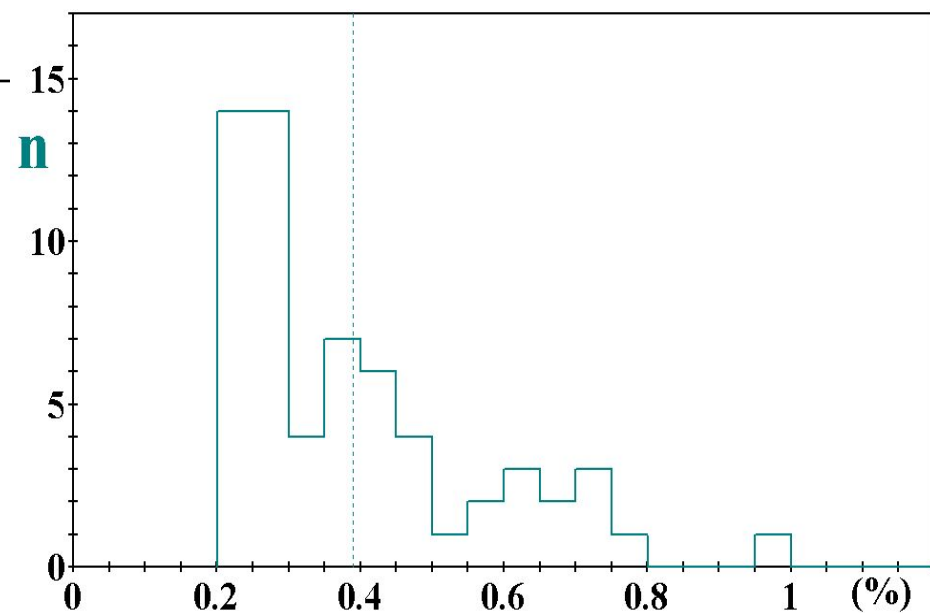
А - 55 событий  $n_{\ominus}/n_{\oplus} = 1.75$ ,

Б - 59 событий  $n_{\ominus}/n_{\oplus} = 0.89$

## Распределение мюонных вариаций по амплитуде возмущений

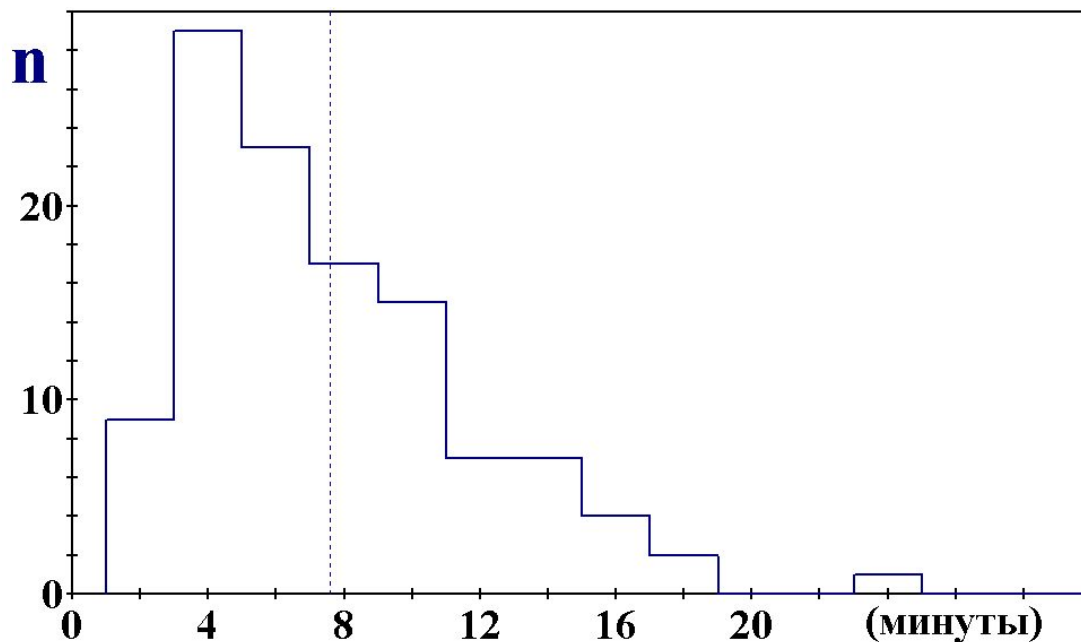


Амплитуды 52 положительных возмущений (%). Среднее значение 0.33%. Среднеквадратичное отклонение 0.11%



Амплитуды 62 отрицательных возмущений (%). Среднее значение 0.39%. Среднеквадратичное отклонение 0.17%.

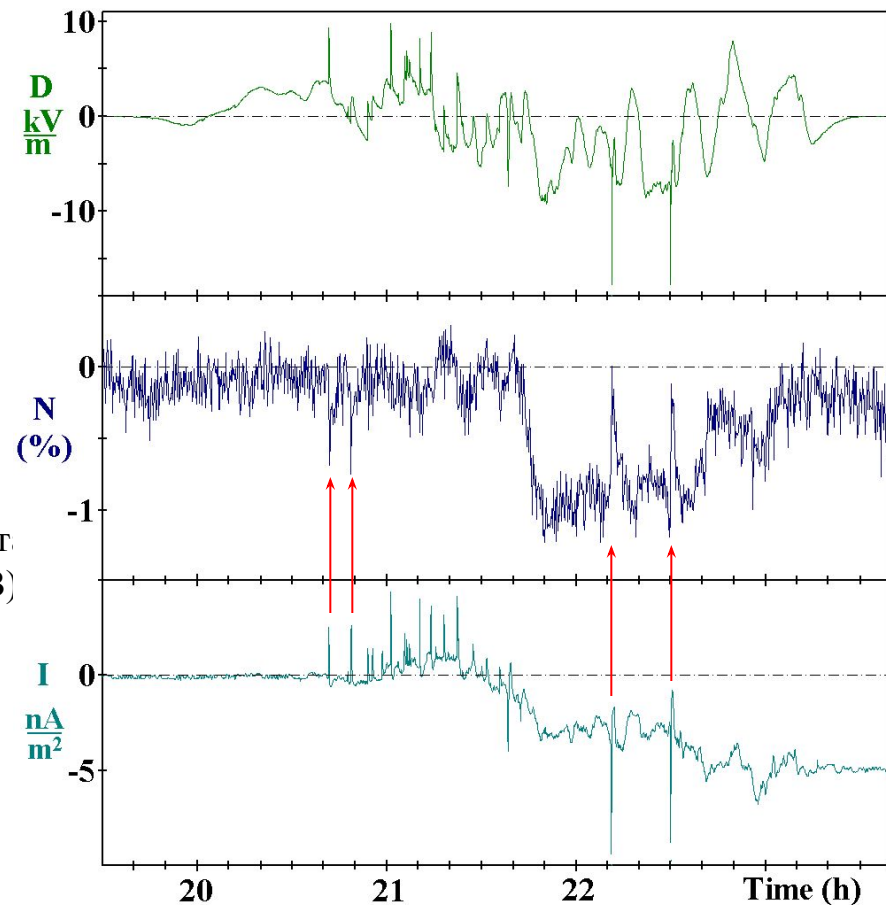
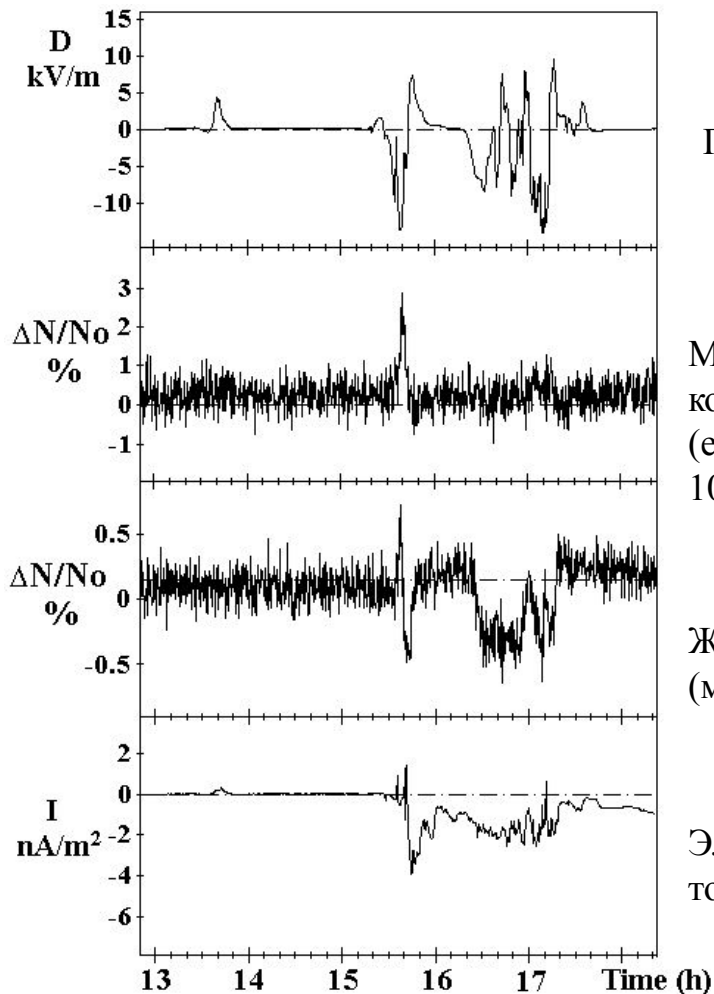
## Распределение вариаций мюонов по длительности эффективного периода



Полное распределение **114** возмущений по эффективной длительности. Вертикальная линия соответствует среднему значению **7.6 мин.** Средне-квадратичное отклонение 4.2 min.



Два сильных возмущения интенсивности мюонов в один календарный день разделенные 7 годами: 24 сентября 2000 г. и 2007 г. В последнем случае наблюдаются резкие вариации связанные с разрядами молний



## Какова ситуация с интерпретацией всего этого набора данных по вариациям космических лучей во время гроз?

---

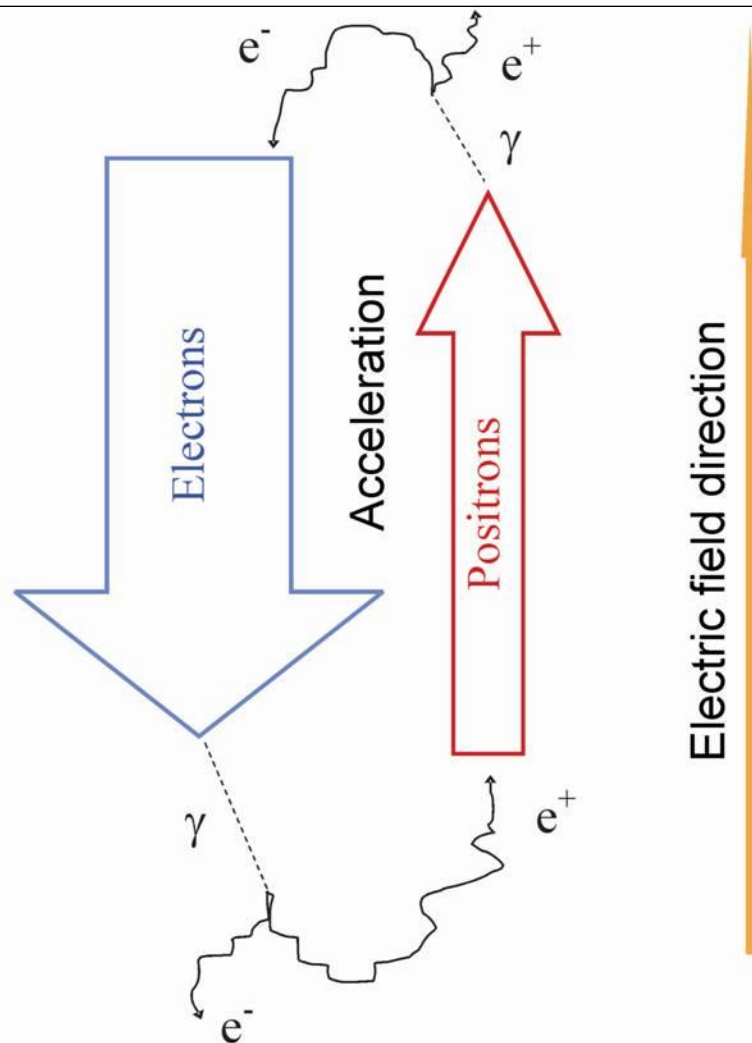
- Регулярные корреляции с приземным полем:  
Трудно измерить, но относительно легко интерпретировать.  
**Мягкая компонента:**  
Трансформация спектра + гамма-кванты от убегающих электронов  
**Жесткая компонента:**  
Трансформация спектра + эффект распада
- С яркими событиями ситуация, скорее, противоположная: возможны различные механизмы и места генерации.

## Модель генерации частиц грозовыми облаками. Вторичные КЛ – Затравочные частицы а электрическое поле – резервуар энергии

При стабильных условиях и достаточной напряженности ( $D$ ) и протяженности (от  $x_0$  до  $x_1$ ) поля интенсивность частиц растет экспоненциально ( $K$  – вероятность одного цикла, а  $\tau$  – его длительность):

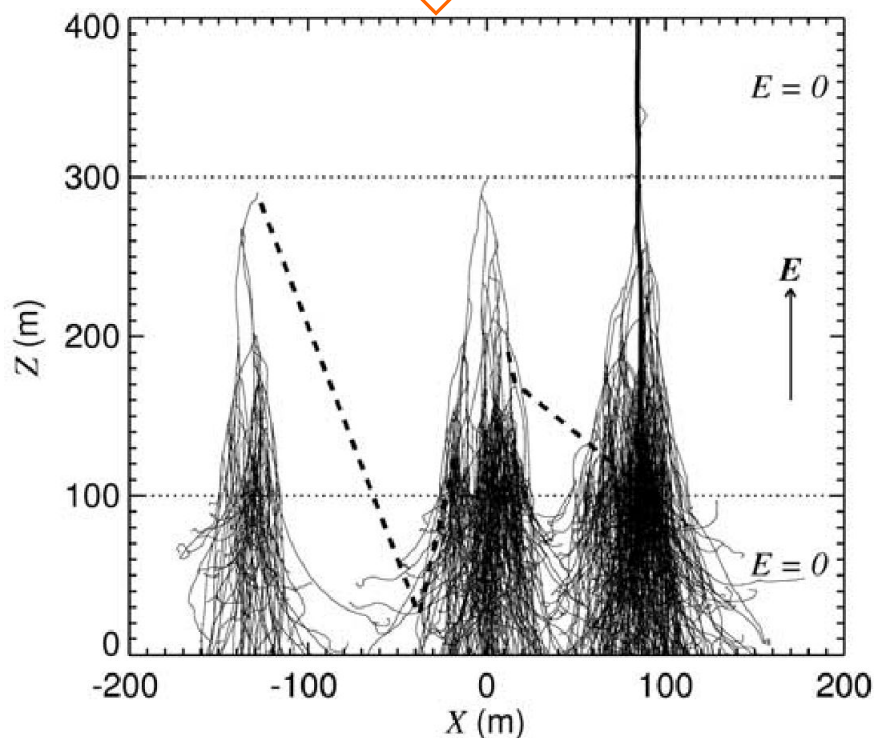
$$I(\varepsilon_{SC}, t) = I(\varepsilon_{SC}, t_0) \exp\left\{\frac{t - t_0}{T_D}\right\},$$

$$T_D = \frac{\tau}{K^2(D, x_0, x_1)}$$

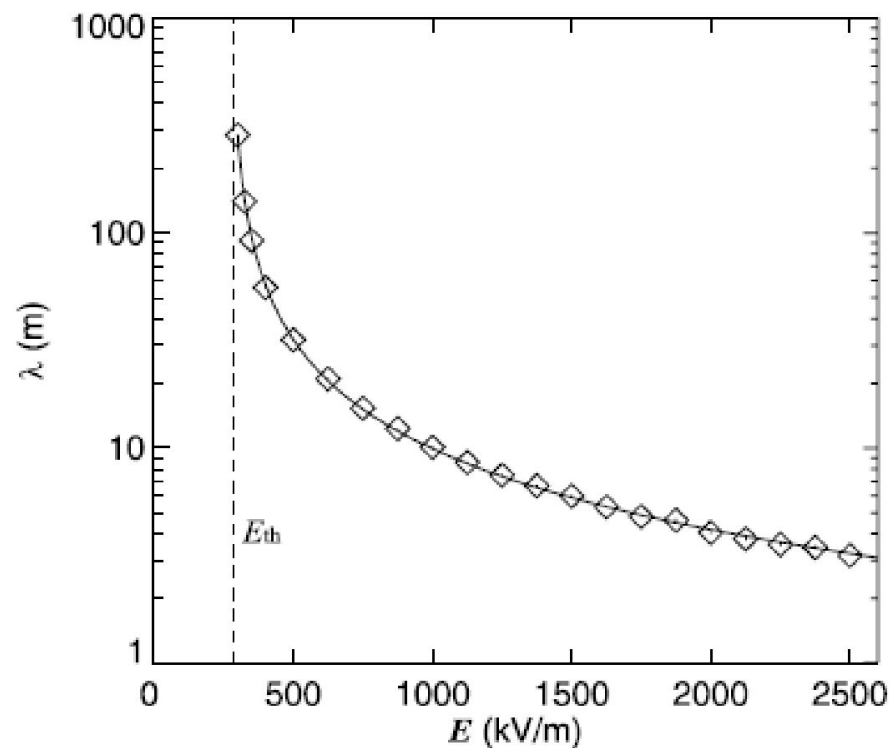


В расчетах J. Dwyer (2003) методом Монте Карло также рассматривалась обратная связь, однако другого типа.

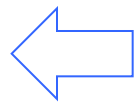
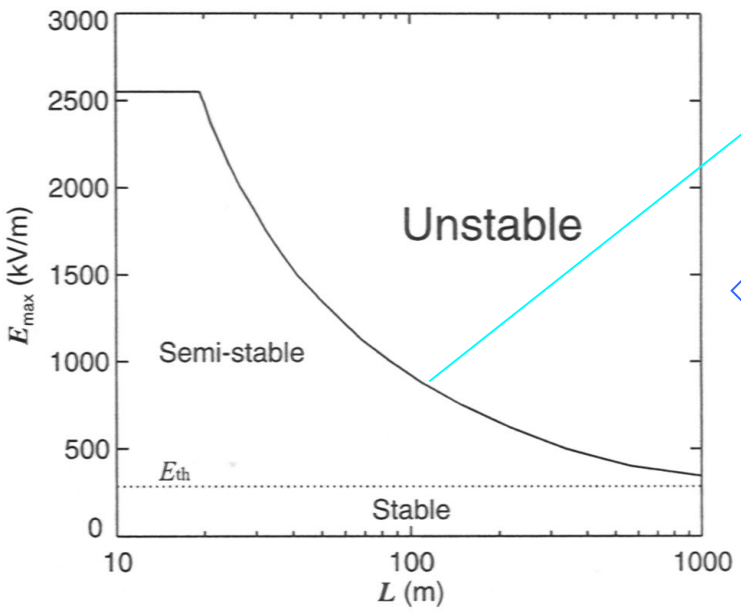
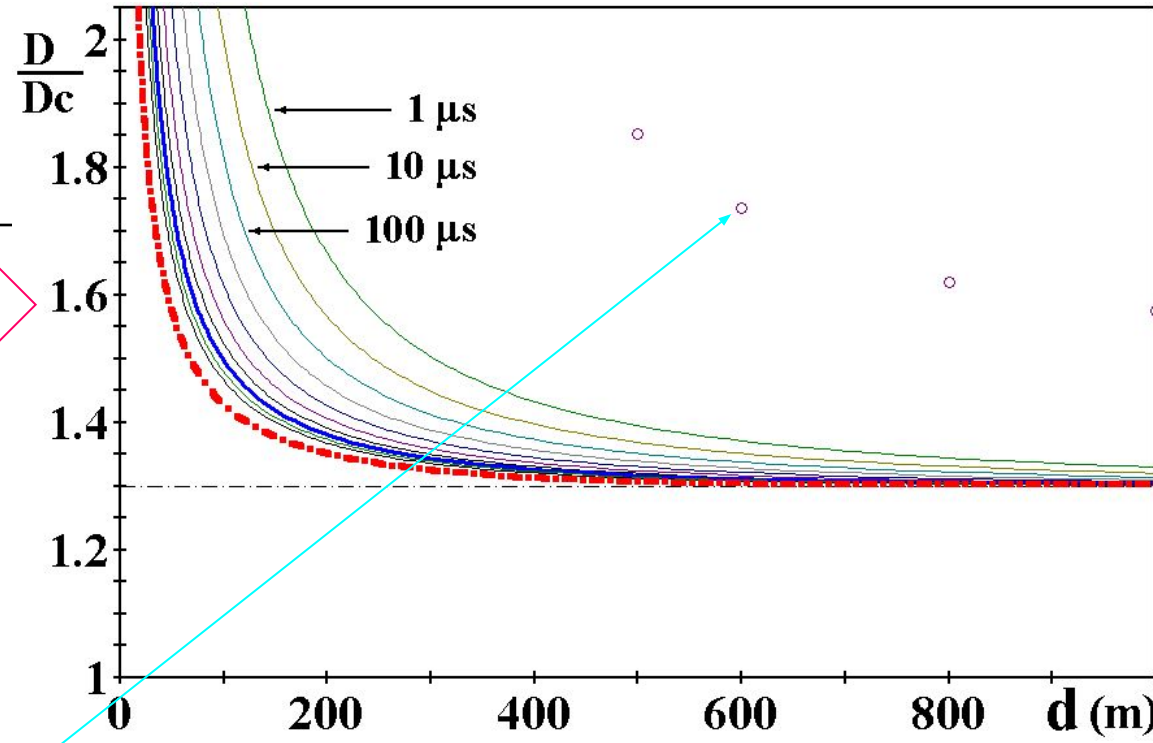
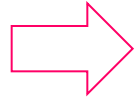
Электрическое поле 1000 кВ/м



Вблизи порога (критическое поле) характерная длина близка к радиационной единице

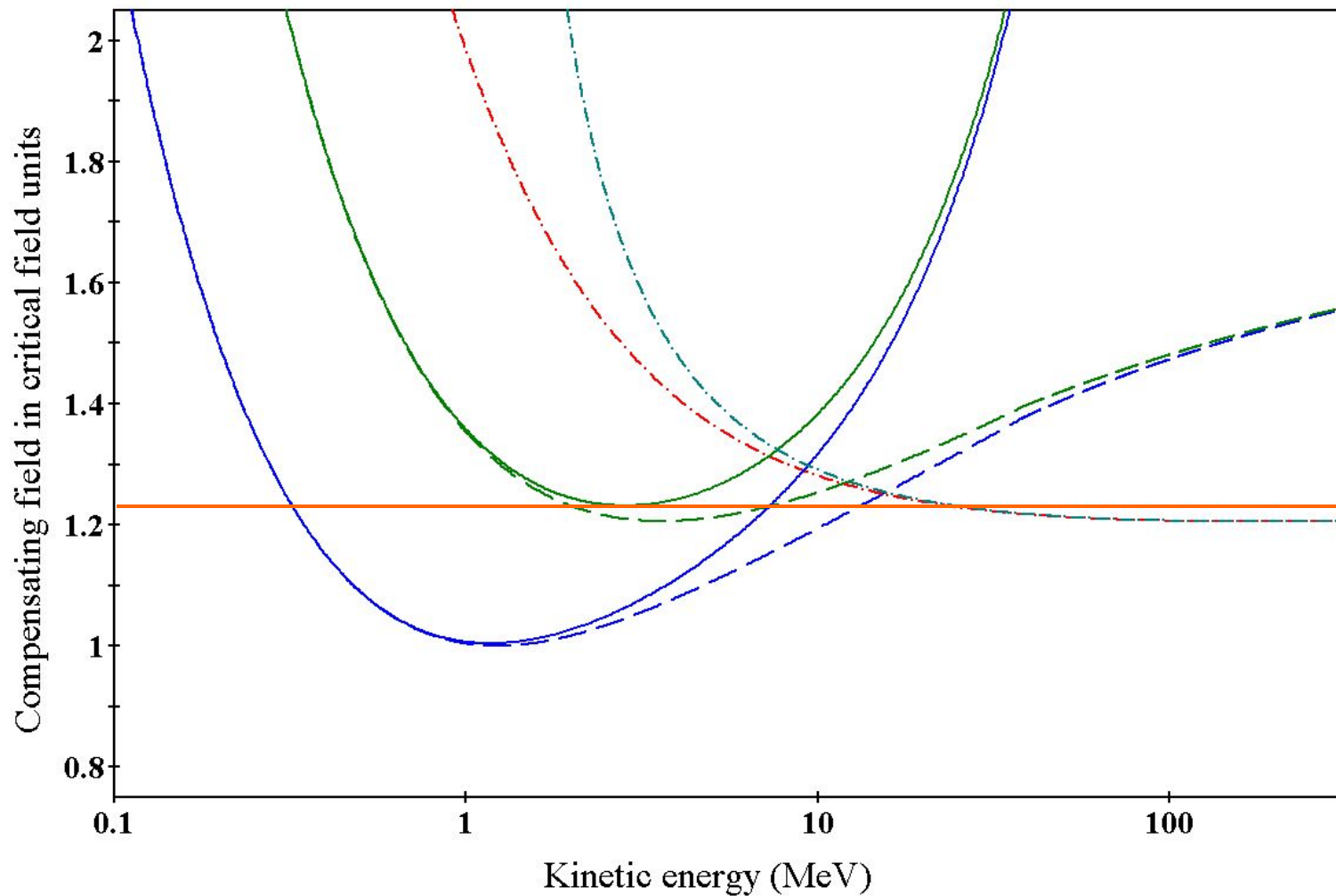


Напряженность поля как функция его протяженности для процесса генерации с разными временами нарастания.



Фундаментальный предел на электростатическое поле рассчитанный J.R. Dwyer. (Geophys. Res. Lett., 30, 2055 (2003)) при давлении 1 атм.

# Разрешенные области для убегающих частиц и процесса с обратной связью



# Выводы

---

- Во время гроз наблюдается большое разнообразие эффектов с вариациями разных компонент космических лучей.
- Не все механизмы их пока ясны, но экспериментальные данные о них образуют базис для дальнейших исследований и построения адекватных моделей фундаментальных процессов в грозовой атмосфере.
- Для построения полной картины явления желательно расширять фронт исследований (проводить наблюдения на разных высотах).