

# **Diagnosis of the electrical state of the atmosphere from variations in cosmic rays**

Khaerdinov MN, Khaerdinov NS, Lidvansky AS  
INR RAS

## **Введение в проблему**

- Электрическое состояние атмосферы меняется в широких пределах от  $100\text{В/м}$  до  $\sim 1\text{МВ/м}$ , отражая динамику изменения грозových процессов, что влияет на жизнь людей.
- Космические лучи, пронизывая атмосферу, зондируют ее состояние, при этом формируются вариации их интенсивности.
- Используя теорию формирования вариаций можно восстановить основные характеристики электрического состояния атмосферы.

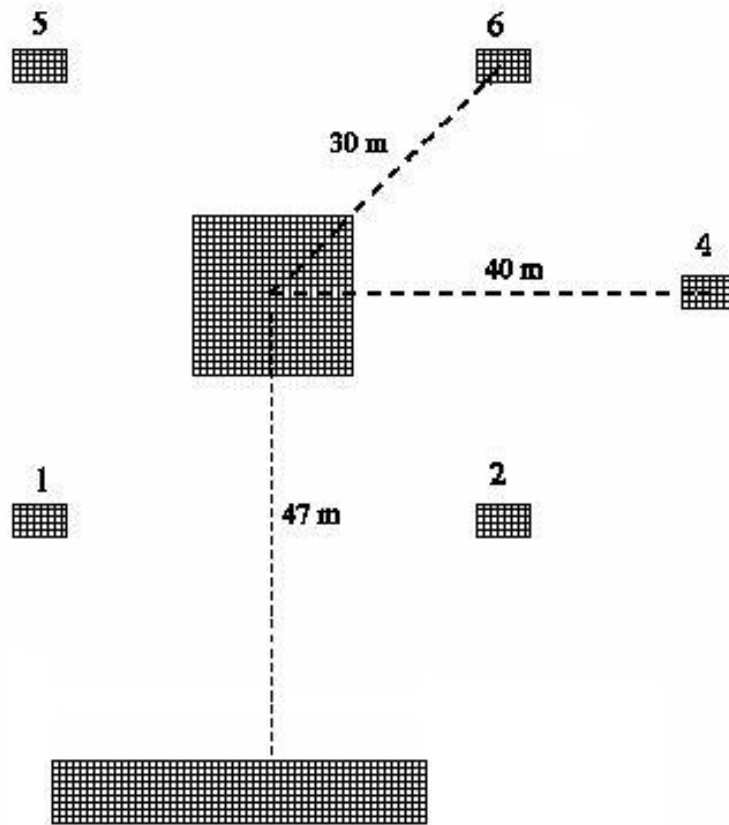
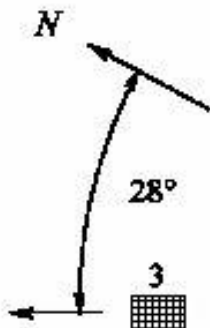
## **Цель работы:**

- Уточнение параметров теории формирования вариаций мюонов.

# Установка:

Сцинтилляционные детекторы .

Центральная часть-  
«Ковер» (200 м<sup>2</sup>)  
расположена в здании.



«Фургоны» (54 м<sup>2</sup>) - в шести выносных пунктах.

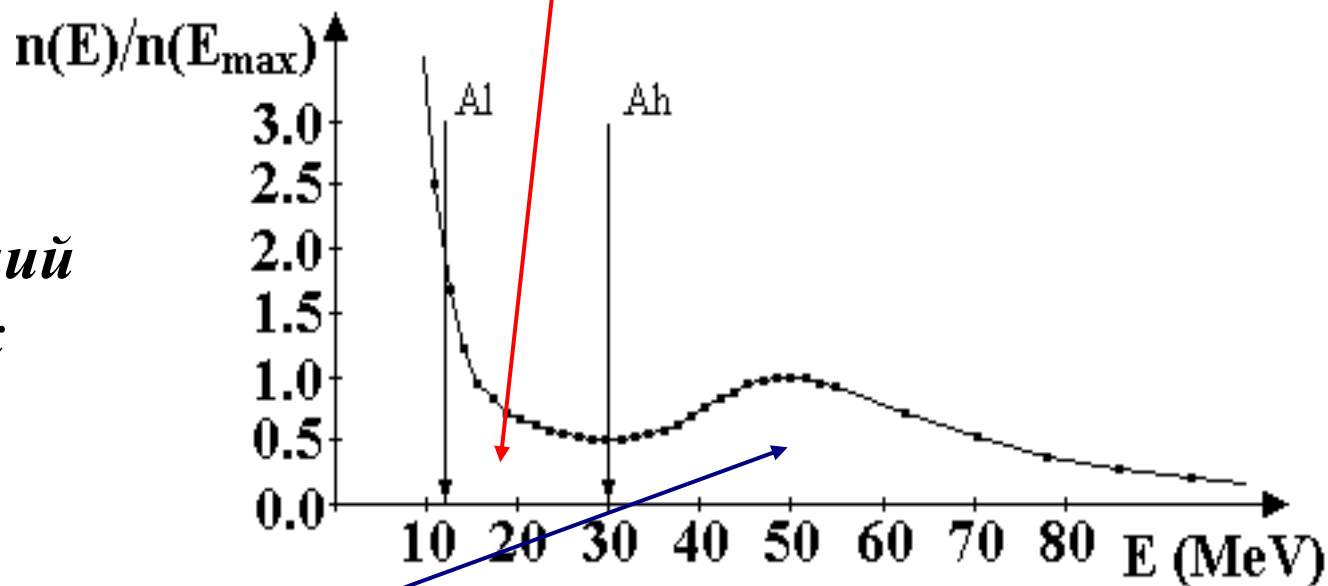
«Мюонный детектор» (175м<sup>2</sup>) в здании подвального типа - крыша – 2 метра скального грунта.

# Основные каналы информации:

**Мягкая компонента:** регистрируется внешними пунктами в диапазоне энерговыделения в детекторе **10-30 МэВ**

Состав: 56% -  $\gamma$ , 31% -  $e^{\pm}$ , 13% -  $\mu$

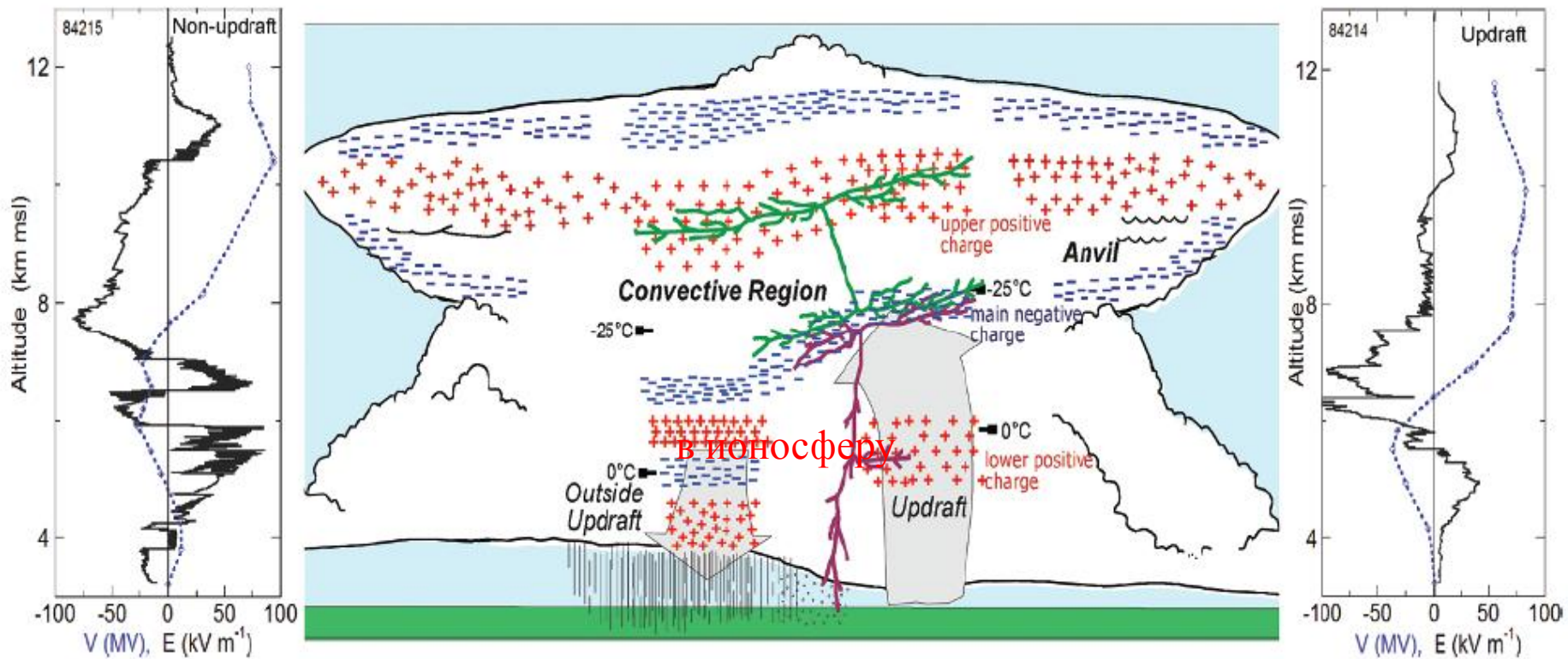
*Спектр  
энерговыделений  
в слое базовых  
детекторов*



**Жесткая компонента:** регистрируется детекторами в здании под бетонной крышей ( $29 \text{ г/см}^2$ ) в области выше **30 МэВ**.

Состав: 83% -  $\mu$ , 10% -  $e^{\pm}$ , 7% -  $\gamma$ .  $E(\mu) > 100 \text{ МэВ}$ .

# Современное представление электрической структуры зрелого грозового облака



- локально напряженность может достигать критического значения для пробоя на убегающих электронах ( $\sim 300 \text{ кВ/м}$  при нормальных условиях), но отличается быстрой сменой знака так что разность потенциалов меняется медленно.
- общее сопротивление между ионосферой и земной поверхностью  $230 \text{ Ом}$  что обеспечивает разность потенциалов  $0.2 \text{ МВ}$ .

# Механизм формирования вариаций мюонов в вертикальном поле

Уравнение движения частиц в сферической системе координат, для произвольного азимута:

$$\begin{cases} d\varepsilon/ds = e\beta \cdot \cos \theta - \alpha \\ d\theta/ds = -(e\beta \sin \theta)/\varepsilon \end{cases}$$

$\varepsilon$  – кинетическая энергия частицы,  $ds$  – элемент пути частицы,  $\theta$  – зенитный угол,  $\alpha = 2 \text{ МэВ}/(\text{г}/\text{см}^2)$  – средние потери энергии мюона в среде.  $e\beta = e \cdot dV/dz$  – электрическая сила действующая на частицу, нормированная на плотность ( $\beta \leq \alpha$ ),  $e$  – электрический заряд частицы,  $V$  – разность потенциалов от уровня генерации частиц до координаты  $z$ .

## **Механизм формирования вариаций мюонов в вертикальном поле**

$$\begin{cases} d\varepsilon/ds = e\beta \cdot \cos \theta - \alpha \\ d\theta/ds = -(e\beta \sin \theta)/\varepsilon \end{cases}$$

- Из первого уравнения следует, что влияние атмосферного поля проявляется в изменении энергии частиц на величину разности потенциалов между точкой рождения и точкой регистрации. При этом вследствие сильно нелинейной зависимости функции выживания мюонов от их энергии должно быть общее уменьшение регистрируемых частиц вне зависимости от знака поля.
- Из второго уравнения следует фокусирующее влияние поля. Фокусировка дает положительный, не зависящий от знака поля, эффект.

**Таким образом:**

Влияние поля должно проявляться в виде сложной зависимости от смещения спектра, распада и фокусировки.

Проявление указанного механизма на интенсивности частиц автоматически учитывается в решении кинетического уравнения.

# Решение кинетического уравнения

Кинетическое уравнение – баланс числа частиц в элементе фазового пространства.

Использованы приближения:

- Рассматривается симметричный по азимуту случай.
- Полное изменение спектра мюонов под действием поля рассматривается как два последовательных процесса трансформации – по углу и по энергии.

То есть  $I(z, E_0, \theta_0) \rightarrow I(z, E, \theta)$ , где  $I(z, E_0, \theta_0)$  – интенсивность мюонов с энергией превышающей  $E_0$ , двигающихся под углом  $\theta_0$  на глубине атмосферы  $z$ , в случае без поля, а  $I(z, E, \theta)$  – трансформированный полем спектр.  $E = E_0 + \Delta E(B, E_0, \theta_0)$ ,  $\theta = \theta_0 - \Delta\theta(B, E_0, \theta_0)$ ,  $\Delta E$ ,  $\Delta\theta$  – смещение энергии и угла.



# Построение угловой зависимости

Трансформацию по углу оценивается с точностью до второго порядка малости смещения направления, представив его в виде разложения в степенной ряд.

$$I(> E, \theta) = I(> E, \theta_0) - \Delta\theta \frac{d}{d\theta_0} [I(> E, \theta_0)] + \frac{\Delta\theta^2}{2} \frac{d^2}{d\theta_0^2} [I(> E, \theta_0)]$$

Характерное смещение направления получено из решения уравнения движения для частиц в поле. А трансформированный спектр по энергии определяется из решения кинетического уравнения для одномерного случая.

# Решение кинетического уравнения для энергетической зависимости

Кинетическое уравнение для интенсивности мюонов  $J_{\mu}^{\pm}$ .  
Одномерный случай.

$$\frac{\partial J_{\mu}^{\pm}(z, \varepsilon)}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left\{ \alpha_{\mu} - e^{\pm} \beta(z) \right\} J_{\mu}^{\pm}(z, \varepsilon) = - \frac{b_{\mu}}{zpc} J_{\mu}^{\pm}(z, \varepsilon) + U_{\mu}^{\pm}(z, \varepsilon)$$

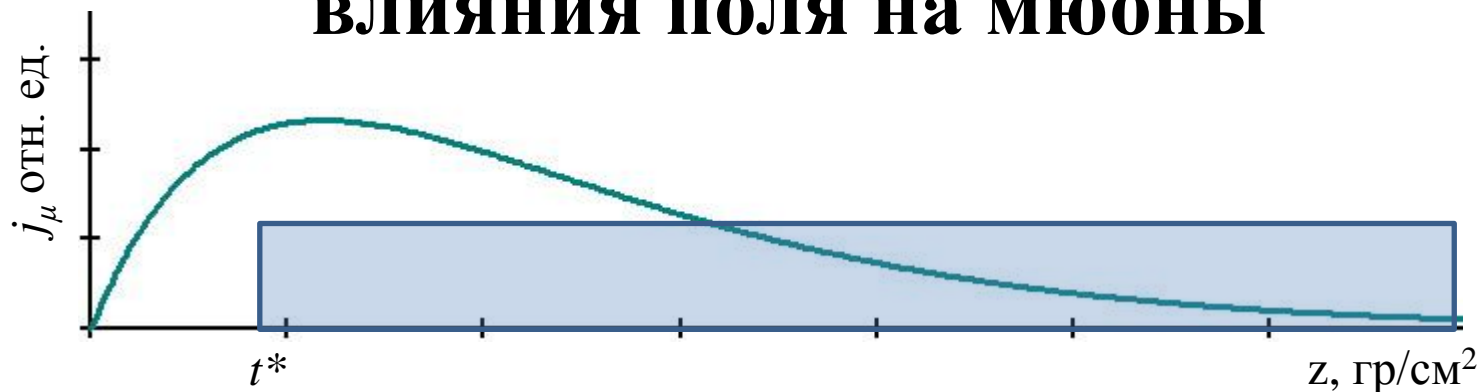
$U_{\mu}^{\pm}$  – функция генерации мюонов,  $p$  – импульс частицы,  $c$  – скорость света,  $b_{\mu} = 1 \text{ ГэВ}$  – константа распада мюонов.

Решение для уровня регистрации  $z_0$ :

$$J_{\mu}^{\pm}(z_0, E) = \int_0^{z_0} \left\{ U_{\mu}^{\pm}(t, p^{\pm}(t, E)) \cdot \exp \left[ -b_{\mu} \int_t^{z_0} \frac{dt'}{t'cp^{\pm}(t', E)} \right] \right\} dt =$$
$$= \int_0^{z_0} j_{\mu}^{\pm}(t, p^{\pm}(t, E)) dt$$

$j_{\mu}^{\pm}$  – плотность распределения генерации мюонов регистрируемых установкой в зависимости от высоты.

# Определение эффективной границы влияния поля на мюоны



Плотность распределения генерации мюонов регистрируемых установкой в зависимости от высоты

Поскольку мюонов в верхней области атмосферы из числа регистрируемых установкой мало, а энергии их велики, то влияние поля проявляется слабо. Делим всю атмосферу на две части по эффективному влиянию поля – нижнюю, влияющую на интенсивность частиц и верхнюю, не влияющую. Такое качественное представление для каждой области в количественном выражении входит с ошибкой, но вклад этих ошибок в суммарную интенсивность имеет разный знак.

# Граничные условия для решения кинетического уравнения

Используя тождественные преобразования выражаем возмущенную полевую интенсивность в виде произведения смещенного по энергии спектра на возмущение функции выживания куда входит влияние приземного поля и суммы двух ошибок разных областей

$$J_{\mu}^{\pm}(z_0, E) = J_{\mu_0}^{\pm}(z_0, E - \Phi_{t^*, z_0}) \cdot \exp \left[ -b_{\mu} \int_{t^*}^{z_0} \left( \frac{1}{cp^{\pm}(t')} - \frac{1}{cp_{\Phi}^{\pm}(t')} \right) \frac{dt'}{t'} \right] + \Delta_{0, t^*} + \Delta_{t^*, z_0}$$

Граница области чувствительности мюонов к влиянию поля определяется равенством нулю ошибки такой интерпретации.

Граничные условия:

$$\begin{cases} \Delta_{0, t^*} + \Delta_{t^*, z_0} = 0 \\ \Phi_{0, t^*} + \Phi_{t^*, z_0} = 0 \end{cases}$$

$\Phi_{a,b}$  — разность потенциалов между уровнями  $a$  и  $b$ ,  
 $t^*$  - эффективная граница влияния атмосферного поля на интенсивность регистрируемых мюонов.

# Заключение

Было проведено уточнение границы эффективного влияния поля по отношению к уже полученным результатам. Ранее в качестве этого значения был взят центр тяжести генерации мюонов исходя из условия малой протяженности поля расположенного вблизи поверхности земли. При интерпретации результатов с полем значительной протяженности игнорировалась ошибка в определении границы чувствительности метода.

У этой границы сильная зависимость от энергии мюонов – чем выше энергия тем выше граница. Связано с нелинейной зависимостью функции распада частиц от нее.

# Результаты:

- При определении значения разности потенциалов протяженного поля введение корректной высоты чувствительности влияния поля в пределах статистической ошибки на результат не повлияло.
- Значение средней напряженности поля для верхней области поля изменилось значительно. Так в грозовом событии 20.07.2014г, описанном в работе [Метод определения основных параметров грозового поля по вариациям мюонов, регистрируемых горизонтальной установкой. М.Н. Хаердинов, Н.С. Хаердинов, А.С. Лидванский, Изв. РАН, сер. физ., 2017, том 81, №2, с.246-249] для момента максимума аномального мюонного возмущения соответствующего установлению разности потенциалов в стратосфере  $\sim 375$  МВ средняя напряженность верхней атмосферы в единицах критической напряженности  $\delta=2.7$  (против приведенных в работе  $\delta=1.03$ ).

**Спасибо за внимание!**