

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 100В/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.

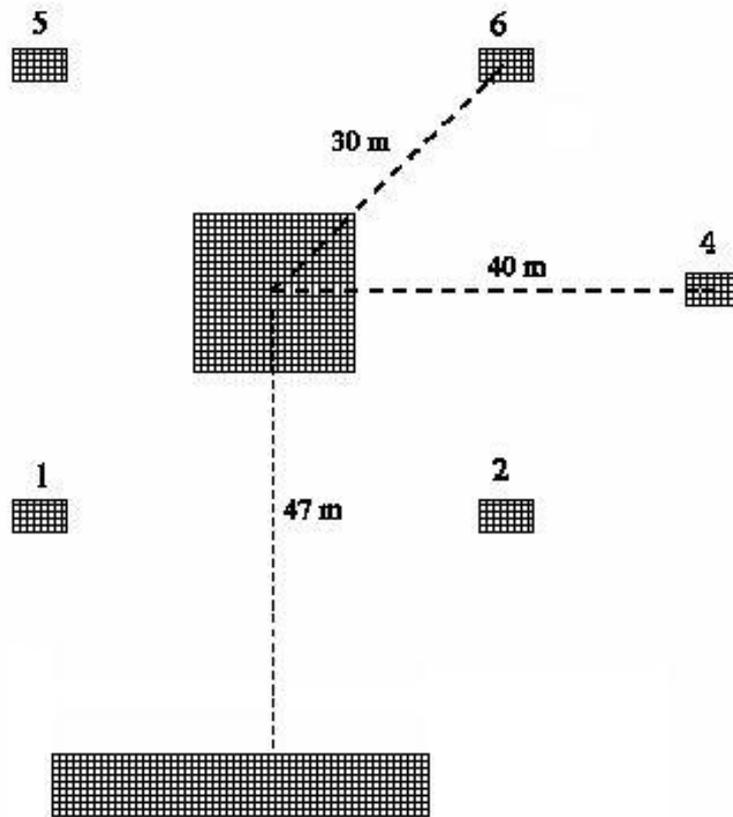
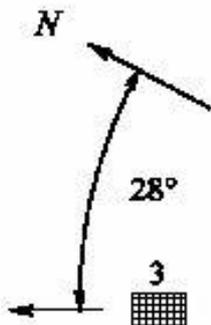
Цель работы:

- Уточнение параметров теории формирования вариаций мюонов.

Установка:

Сцинтилляционные детекторы .

Центральная часть-
«Ковер» (200 м²)
расположена в здании.



«Фургоны» (54 м²) - в шести выносных пунктах.

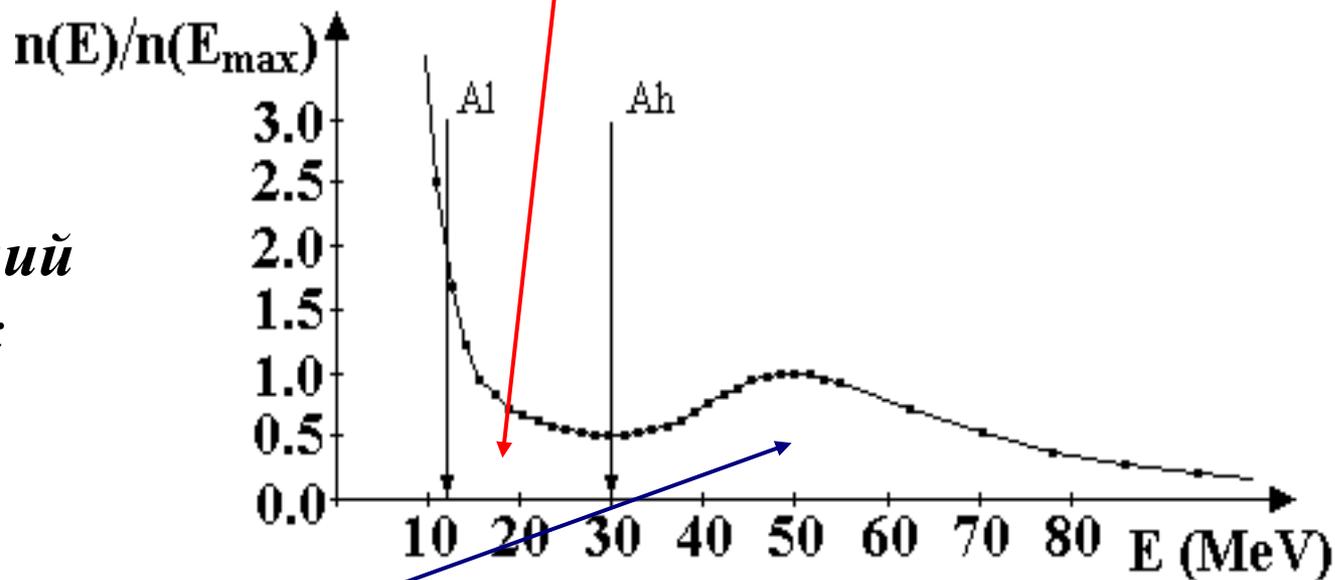
«Мюонный детектор» (175 м²) в здании подвального типа - крыша – 2 метра скального грунта.

Основные каналы информации:

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

Состав: 56% - γ , 31% - e^{\pm} , 13% - μ

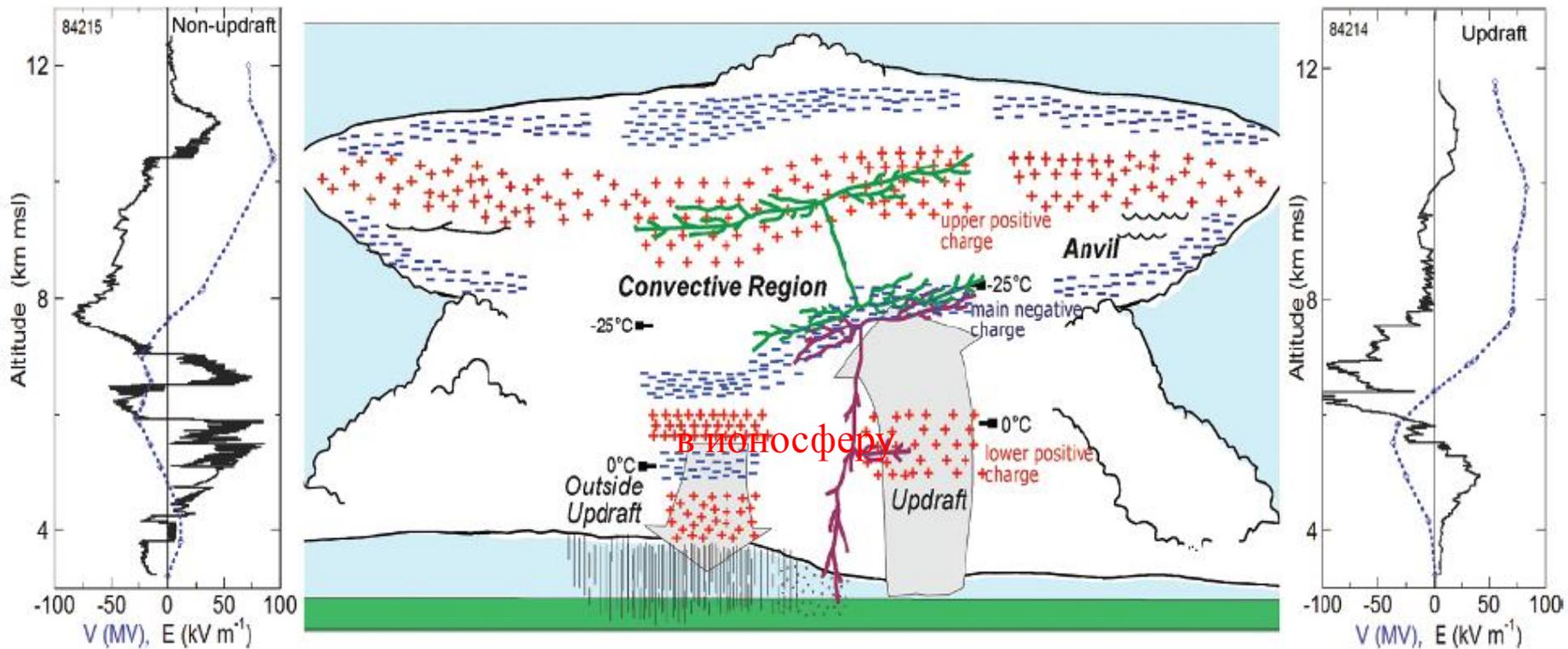
*Спектр
энерговыделений
в слое базовых
детекторов*



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

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

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 Ом что обеспечивает разность потенциалов 0.2 МВ .

Механизм формирования вариаций мюонов в вертикальном поле

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

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

ε – кинетическая энергия частицы, ds – элемент пути частицы, θ – 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 θ_0 на глубине атмосферы z , в случае без поля, а $I(z, E, \theta)$ – трансформированный полем спектр. $E = E_0 + \Delta E(B, E_0, \theta_0)$, $\theta = \theta_0 - \Delta\theta(B, E_0, \theta_0)$, ΔE , $\Delta\theta$ – 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_{μ}^{\pm} .
Одномерный случай.

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

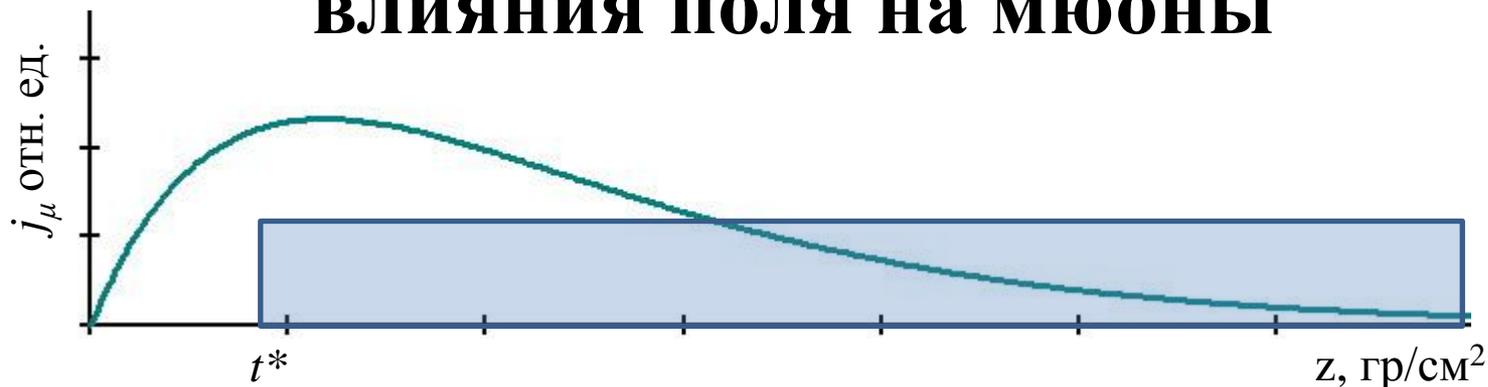
U_{μ}^{\pm} – функция генерации мюонов, p – импульс частицы, c – скорость света, $b_{\mu} = 1 \text{ ГэВ}$ – константа распада мюонов.

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_{μ}^{\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 ~ 375 МВ средняя напряженность верхней атмосферы в единицах критической напряженности $\delta=2.7$ (против приведенных в работе $\delta=1.03$).

Спасибо за внимание!