Оценка влияния горизонтального электрического поля в атмосфере на интенсивность мюонов, регистрируемых на уровне земли.

Хаердинов Н. С.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

В статье [1] приводится экспериментальное свидетельство влияния аномального атмосферного поля хорошей погоды на вариации мюонной интенсивности. На основе анализа выдвинуто было мнение о возможном наличии регулярно появляющегося в атмосфере, в условиях гор, в период утро-вечер, горизонтального электрического поля.

Цель. ***Дать количественное описание явлению горизонтальных полей***
Задача. На примере опубликованного ранее события оценить напряжённость горизонтальных полей, способных вызвать зарегистрированные утро – вечерние вариации в геофизических условиях установки «Ковёр» БНО ИЯИ РАН.

В настоящей работе даются количественные теоретические оценки влияния горизонтальных электрических полей в атмосфере на интенсивность регистрируемых на уровне земли мюонов. Приводятся экспериментальные указания возможное присутствие такого влияния. Оно приводит к трансформации проинтегрированного по азимуту углового распределения мюонов одиночной компоненты. Проявляется в занижения интенсивности частиц, под большими углами и слабой чувствительностью к полю – вертикальных.

Введение. Описание процедуры

В статье [2] приводится общий принцип оценки вариаций интенсивности мюонов. Его содержание сводится к последовательной процедуре. В начале, осуществляется оценка трансформации энергетического спектра мюонов как отклик интегрированного по энергии потока вертикально направленных частиц на воздействие разности потенциалов от точки генерации до регистрации. Затем, истинный, трансформированный интегральный спектр, зависящий от направления в пространстве, представляем как разложение в ряд Тейлора по параметру малых углов смещения в поле, до второго порядка малости включительно. Для осуществления такой процедуры достаточно, решая уравнения движения частиц в малоугловом приближении получить оценки угловых смещений в зависимости от координат, величины поля и ориентации частиц относительно его направления. Подставив найденные величины в ряд разложения трансформированного спектра, он интегрируется по угловому пространству. Выделяется относительная вариация.

Описанная процедура, предполагающая смещение спектра мюонов по энергии, при низком пороге регистрации (ниже максимума спектра) имеет чувствительный момент – его явное представление, в удобном для аналитических расчётов виде. Для этого фоновый спектр аппроксимируется. В работе даётся описание аппроксимации.

Аппроксимация спектра

Общее решение кинетических уравнений рождения и транспорта мюонов в электрическом поле имеет вид

$$J(E,z_0,A)=\int_E^{\infty} G_\mu(z,\varepsilon(z),A)\cdot\exp\left(-b_\mu\int_z^{z_0}\frac{dt'}{t'\varepsilon(t')}\right)dz,$$

$$\varepsilon(x)=E+\alpha(z_0-z)+B(z,z_0), \qquad (1)$$

$$B(z,z_0)=\int_z^{z_0}\beta(t')dt'\equiv\langle\beta\rangle(t')(z_0-z),\quad \beta=eD/\rho,\quad B(\lambda,z_0)\equiv\Phi.$$

Здесь G – функция генерации пи-мезонами и каонами зарегистрированных на уровне земли (z_0) мюонов. Параметр A отвечает за снижение наклона спектра частиц в низко энергичной области обусловленного поведением первичного спектра космических лучей, спецификой ядерных взаимодействий, потерями энергии протонов на ионизацию и влиянием геомагнитного обрезания [3, стр.419]. Обычно участвует в виде смещения спектра по энергии на величину A [3, стр.463]. β – электрическая сила, нормированная на плотность, действующая на электрон. D – напряжённость поля. Нужно заметить, в силу сохранения тока в атмосфере и того факта, что проводимость её в стандартных условиях на большом протяжении пропорциональна плотности, электрическое поле атмосферы, в этих единицах измерения мало изменяемая величина.

Тождественными преобразованиями, решение сводится к выражению:

$$J(E,z_0)=J(E-\Phi,z_0)\cdot\exp\left(b_\mu\int_{t^*}^{z_0}\frac{B(t^*,t')dt'}{t'\varepsilon(t')}\right)\cdot[1+\Delta(z_0,t^*)] \qquad (2)$$

t* - промежуточный уровень отсчёта разности потенциалов на двух участках составляющих всю атмосферу, от ионосферы до земли. Верхняя разность потенциалов: $\Phi(0, t^*) = \langle\beta_S\rangle\cdot(t^*)$. Нижняя: $\Phi(t^*, z_0) = \langle\beta_T\rangle\cdot(z_0 - t^*)$. Поскольку $\Phi(0, z_0) \approx 0$, то $\Phi(0, t^*) = -\Phi(t^*, z_0)$, и $\langle\beta_S\rangle = -\langle\beta_T\rangle\cdot$. Параметр Δ имеет 1-й порядок малости по отношению действующей силы электрического поля к скорости потерь энергии частицей на ионизацию, но этого недостаточно, поскольку нас интересует отклик до второго порядка. Δ имеет вид достаточно громоздкий для написания, но, выполняет важную роль. Решение уравнение $\Delta(z_0, t^*) = 0$, определяет положение уровня t* для отсчёта интересующей нас разности потенциалов $\Phi(t^*, z_0)$, то есть, его верхнего уровня. Решение, в графическом виде, для нескольких энергий частиц, представлено на рисунке 1 .

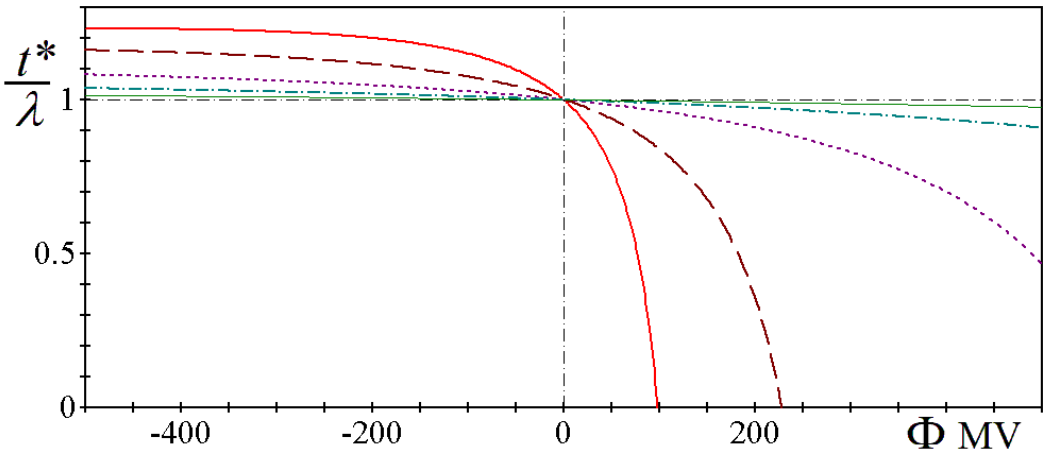


Рис. 1 Положение верхнего уровня отсчёта потенциала Φ(t*, z_0), относительно среднего уровня генерации мюонов регистрируемых установкой с разными импульсами. Красная сплошная: 176 МэВ/с. Коричневая пунктирная 400 МэВ/с. Фиолетовые точки 1000 МэВ/с, Бирюзовый штрих-пунктир – 2000 МэВ/с. Зелёная тонкая сплошная – 4000 МэВ/с.

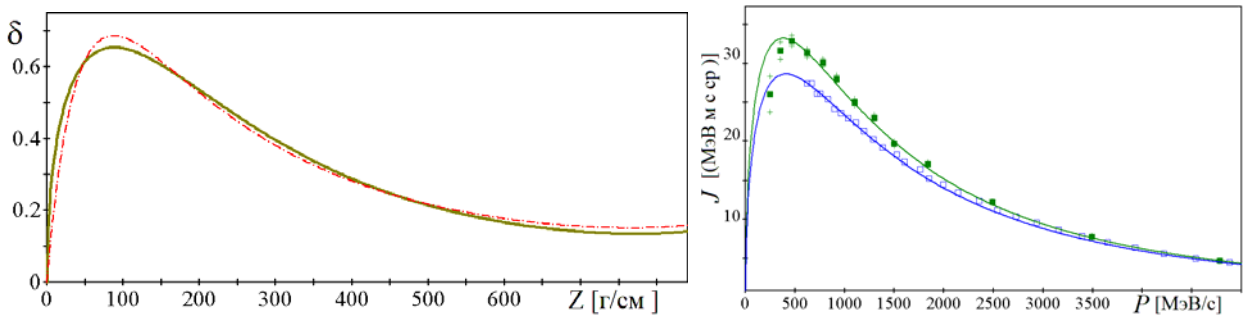
При характерных грозовых потенциалах ~ 100 МВ и характерных энергиях частиц, регистрируемых на установке, отличие положения t* от уровня генерации 20%, то есть, порядка 30- 40 г/см^2. Его смещение вызвано необходимостью компенсации влияния ускорения частиц в области выше, где поле противоположно нижнему. Таким образом, важна оценка среднего уровня генерации мюонов. Кроме того, важно и корректное описание области энергетического спектра регистрируемых частиц в районе максимума.

Для теоретического анализа вариаций удобно представлять выражения в виде элементарных функций. Анализировать спектр мюонов в виде (1) – сложно. Обычно, интегрирование по высоте аппроксимируют в виде произведения функции генерации, вычисленной на средней высоте на вероятность выживания мюонов от этой высоты до места регистрации. При том, всё равно, выражение для спектра представляются в виде иррациональных функций, сложных для дальнейшего анализа.

В работе проводилась аппроксимация подынтегральной функции выражения (1)(ниже, выражение слева) удобными для дальнейшего анализа параметрами:

$$\frac{\exp(-z/L_N)}{(E+A+\alpha(z_0-z))^{2.7}}\cdot\left(\frac{z}{z_0}\cdot\frac{E}{E+\alpha(z_0-z)}\right)^{b_\mu/(E+\alpha z_0)}=\frac{g(E)\cdot(1-\exp(-z/L_n(E)))\exp(-z/L_p(E))\cdot E^{-1/2}}{(E+A+\alpha(z_0-z))^3}$$

Поводом для такой аппроксимации явилось желание простым образом отразить часть энергетического спектра ниже максимума. Учитывалась энергетическая зависимость функции выживания при малых энергиях ~ $E^{1/2}$. Также, была необходимость описать формирование высотного максимума без ущерба экспоненциальному поглощению в нижних слоях. Примеры проведённой аппроксимации высотного профиля на рисунке 2(а).



(а) (б)

Рис. 2(а) Аппроксимация высотного хода интенсивности мюонов, регистрируемых на уровне установки «Ковёр» (840 г/см^2) с импульсом 400 МэВ/с. Толстая линия – решение кинетического уравнения. Штрих-пунктирная – аппроксимация рациональными функциями.

Рис. 2(б) Измерения спектров импульса мюонов, выполненные с помощью прибора в Линн-Лейк (Канада), высота 360 м над уровнем моря, Рс = 0,5 ГВ [4] и в Цукубе (Япония), уровень моря, Рс= 11,5 ГВ [5]

Такая аппроксимация позволила легко проинтегрировать генерацию мюонов по высоте. Параметры, характеризующие интеграл оказались слабо зависящими от энергии и позволили, взяв значения характерной величины, интегрировать спектр и по энергии, и по углу, в элементарных функциях. Значение параметра А, отвечающего за уплощение спектра на низких энергиях определялось из эксперимента по детектированию мюонов на установке «Ковёр» с разной пороговой энергией. Нижний порог регистрации мюонов определялся по ионизационным потерям в рабочем веществе детектора и крыше здания (100 МэВ). Частицы с высоким порогом (1300 МэВ) регистрировались «Мюонным детектором», размещённым в подвале с 2-х метровой засыпкой скальным грунтом плотностью 2.65 г/см^2. Характерный порог определялся как энергетические потери частиц, приходящих под углом 34°. Из сравнения расчёта с экспериментом параметр смещения спектра А = 288 МэВ. Между тем, характерное значение этого параметра, используемое в литературе для спектра протонов и мюонов, ~1 ГэВ [3 стр. 421 табл.4.6 и стр. 464].

Для сравнения эксперимента были построены аппроксимации для интенсивности мюонов зарегистрированных на уровне моря двумя установками, разнесённым по широте, данные которых были опубликованы в работах [4] (жёсткость геомагнитного порога обрезания 0.5 ГВ) и [5] (жёсткость порога обрезания 11.5 ГВ. На рисунке 2(б) показаны эти спектры с аппроксимацией параметром А для каждого. Для эксперимента [4] с жёсткостью порога геомагнитного обрезания R_1 = 0.5 ГВ A_1=240 ±10 МэВ. Для [5], где порог R_2 = 11.5 ГВ, A_2=370±10 МэВ. Предполагая линейную зависимость параметра А от широты, вычислен параметр для установки «Ковёр» с жёсткостью порога обрезания R = 5.8 ГВ. $A_K = A_1 + (R - R_1)\cdot(A_2 - A_1)/(R_2 - R_1)$ = 303±20 МэВ. Что хорошо согласуется с экспериментом.

Результаты расчёта. Сравнение с экспериментом

Имея аналитическое описание спектра в области малых энергий мюонов и высотного хода, согласно процедуре, описанной в работе [2], определена регрессия с напряжённостью горизонтального поля в атмосфере. Регрессия представлена только квадратичной зависимостью, в следствии полного интегрирования по азимуту. Имеет вид:

$$\frac{\Delta N(>E,\langle\beta\rangle,\theta_M)}{N(>E,\theta_M)} = B_D(\theta_M)\cdot\left(\frac{\langle D\rangle}{D_C/10}\right)^2$$

D_C, пропорциональная плотности напряжённость критическая для пробоя на убегающих электронах. На уровне моря D_C =216 кВ/м. В виду громоздкого выражения здесь даётся лишь графическое представление коэффициента регрессии представленное на рис. 5. На графике он выражен в процентах на одну десятую от критической напряженности горизонтального поля.

График демонстрирует, зависимость от θ_M - верхней границы зенитного угла регистрации. На рисунке отмечены вертикальным коротким пунктиром границы областей углового пространства, просматриваемые по регистрации мюонов «толстыми» сцинтилляционными детекторами в разных диапазонах энерговыделения частиц. Штрих – пунктиром обозначены соответствующие областям средневзвешенные направления. Очевидно уменьшение интенсивности, в разной степени, но по всей области углов. Формируется искривлением траекторий в поле и, как следствие, потери энергии. Лишь на малых расстояниях ускорение частиц способно конкурировать с этим механизмом. С увеличением угла растёт и дополнительный путь. Ближе к зениту, тормозящиеся частицы сгибают траекторию прижимаясь к зениту. Их траектория становится длиннее, В случае ускорения, частицы отклоняются от зенита сокращая путь. Но, площадь сбора в угловом пространстве, в месте детектирования, тормозящихся частиц, регулярно превышает площадь ускоренных, что и обеспечивает относительный рост регистрации.

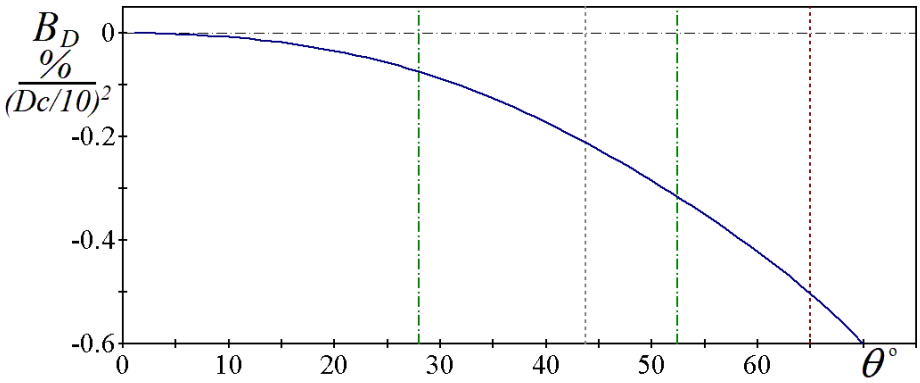


Рис. 3. Квадратичный коэффициент регрессии интенсивности мюонов с горизонтальным полем в атмосфере в зависимости от зенитного угла. Выражен в единицах - процент на квадрат одной десятой критической напряжённости для убегания электронов. Вертикальный короткий пунктир – границы областей. Штрих - пунктир соответствующие -средневзвешенные углы наблюдения.

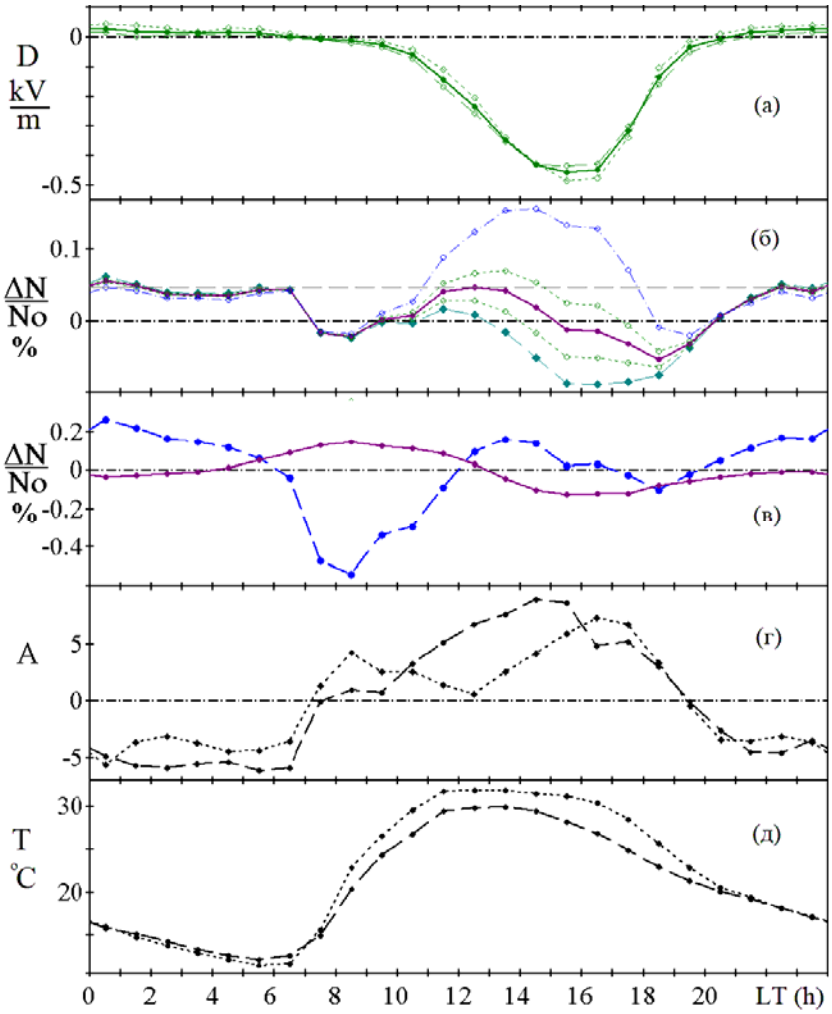


Рис. 4 Среднесуточные вариации периода 29.07.2019–06.09.2019 г., посчитанные по трем суточным массивам составленным из 23 дней. *Md* (13 суток с дневным максимумом мюоной интенсивности), *Mn* (10 суток с максимумом ночью) и их сумме *Ms*. Подробное описание в [1]

(а) Напряженность приземного поля: пунктирная линия – вариация по *Md*, линия мелких и крупных точек – по *Mm*.

(б) Вариации интенсивности мюонов (определенные для массива *Ms*:-сумма 23 дня) – нижняя линия мелких и крупных точек. Далее, по высоте линий – вариации скорректированные на влияние приземного поля разной протяжённости 100 г/см^2, 200 г/см^2, 300 г/см^2, 600 г/см^2. Сплошной фиолетовой линией отмечена коррекция на , 200 г/см^2, соответствующая протяжённости 2 км над установкой – до вершин окружающих гор.

(в) Вариации интенсивности мюонов, регистрируемых в разных областях зенитного угла. Фиолетовая сплошная линия –«вертикальные» (область 0°-44°), синяя пунктирная – «периферия» близкая к горизонту (область 44°-65°).

(г) Вариация диагностического параметра А (относительные единицы), характеризующий коэффициент усиления сигналов с детекторов до регистрации.

(д) Датчик температуры улицы.

На рисунке 4 представлены данные, наряду с опубликованными в работе [1], соответствующие, указанным на рисунке 5 областям углового пространства. «Вертикальные» (0°-43.7°), «периферийные» - (43.7°-65°). Из рисунка 6 видно их разное поведение в утренние часы, в период предполагаемого появления горизонтальных полей. Отмечается рост (0.15%) интенсивности «вертикальных» частиц на фоне слабого (-0.05%) общего понижения. При этом, интенсивность на «периферии» испытывает сильное понижение -0.5%. Спектр трансформируется, уменьшая интенсивность ближе к горизонту. Согласно теоретическим оценкам, представленным выше, вариации могут быть объяснены присутствием горизонтального поля в атмосфере с напряжённостью ~ $0.13D_C$ (D_C – критическая напряжённость для убегающих частиц), что соответствует ~28 КВ/м в приземном поле. Наличие небольшого возрастания возмущения «вертикальных» частиц, вместо слабого понижения, можно объяснить влиянием вертикальных полей, в стороне от установки. Отсутствие для «периферийных» частиц аналогичного понижения в вечерние часы, может указывать на разнообразную конфигурацию горизонтальных полей.

В результате анализа можно заключить, что ранее обнаруженный эффект утро – вечерних вариаций в районе БНО в принципе возможно объяснить влиянием сильных горизонтальных полей с привлечением вертикальных.

Выводы

Построена аналитическая модель формирования мюонной интенсивности в горизонтальных полях. Ранее обнаруженный эффект утро – вечерних вариаций в районе БНО, в принципе, возможно объяснить влиянием сильных горизонтальных полей с привлечением вертикальных.

Литература

1. Хаердинов Н. С. Суточная волна приземного электрического поля хорошей погоды в условиях гор и её влияние на интенсивность мюонов. Известия РАН Серия Физическая. 2025, т. 89, №6, с. 852–857; DOI: 10.31857/S0367676525060039

2. С. Лидванский, М. Н. Хаердинов, Н. С. Хаердинов. Вариации потока мюонов космических лучей во время гроз. ЖЭТФ, 2022, том 161, вып. 4, стр. 497–514, DOI: 10.1134/S1063776122040069

3. Хаякава С., Физика космических лучей, М. Мир.1974

4. Jens Kremer, M. Boezio, M. L. Ambriola et al. Measurements of Ground-Level Muons at Two Geomagnetic Locations. Physical Review Letters, V. 83, N.21 (1999) DOI: 10.1103/PhysRevLett.83.4241

5. Nozaki, M.: PICRC, Invited and Rapporteur Papers, AIP Conf. Proc, 516, p. 330 (2000)