

8-е Зацепинские чтения, Москва, 26 мая 2017 г.

Вариации интенсивности групп мюонов на поверхности Земли

Р. П. Кокоулин

НИЯУ МИФИ

ВВЕДЕНИЕ

Частота событий, регистрируемых на поверхности Земли, подвержена вариациям, вызванным изменениями атмосферных условий.

Понимание атмосферных эффектов важно как с точки зрения феноменологии космических лучей, так и для сравнения данных, полученных в разных условиях. Исследование метеоэффектов позволяет также извлечь информацию о соответствующих физических процессах.

Важно отметить, что величины (и даже знак) метеорологических эффектов, а также процессы, ответственные за их формирование, различны для разных компонент космических лучей и для событий разных классов.

В данной работе рассматриваются вариации интенсивности групп мюонов на поверхности Земли. Группой называется событие, связанное с прохождением через установку нескольких генетически связанных мюонов.

Основной источник групп – распады пионов и каонов, генерируемых в ядерно-каскадном процессе, вызванном высокоэнергичными первичными частицами.

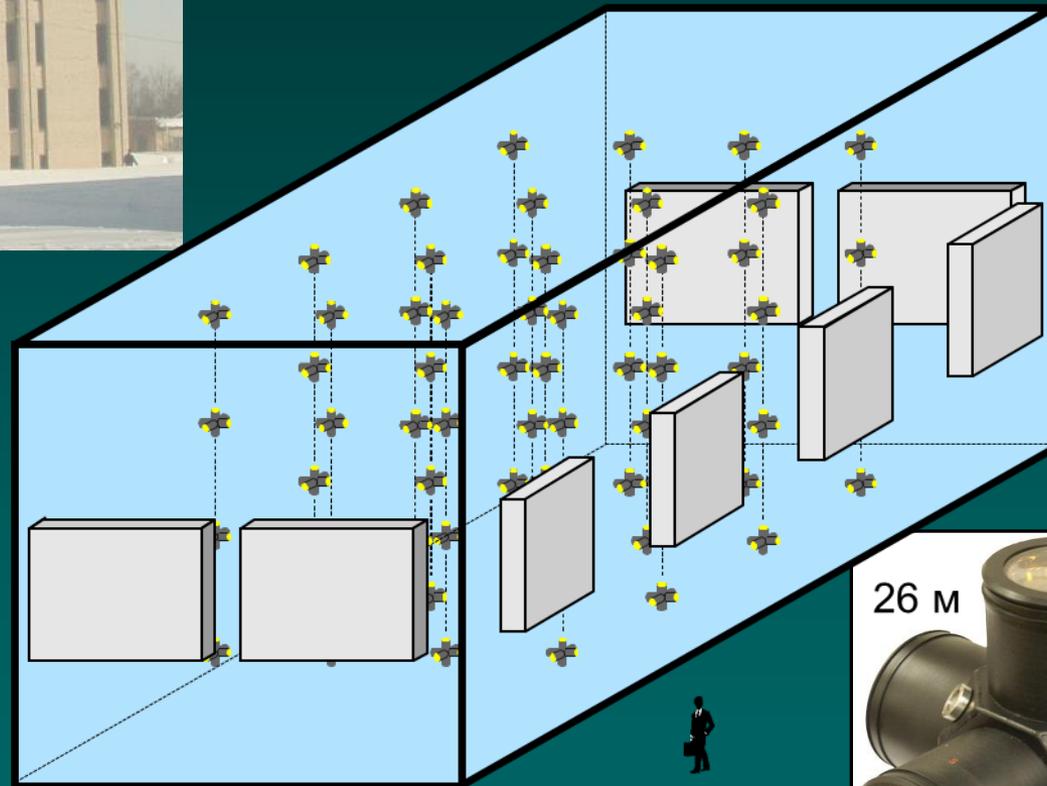
Регистрация групп мюонов с помощью установки относительно небольших размеров соответствует отбору событий по локальной плотности мюонов в точке наблюдений.

Experimental complex NEVOD-DECOR



NEVOD

9 x 9 x 26 m³ volume;
91 QSM; 546 PMT

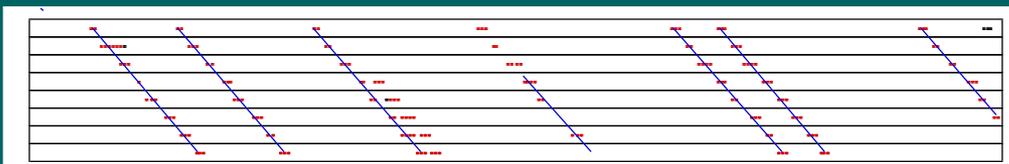
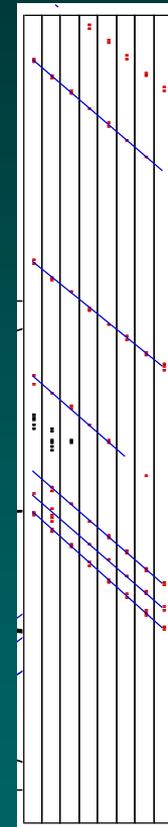
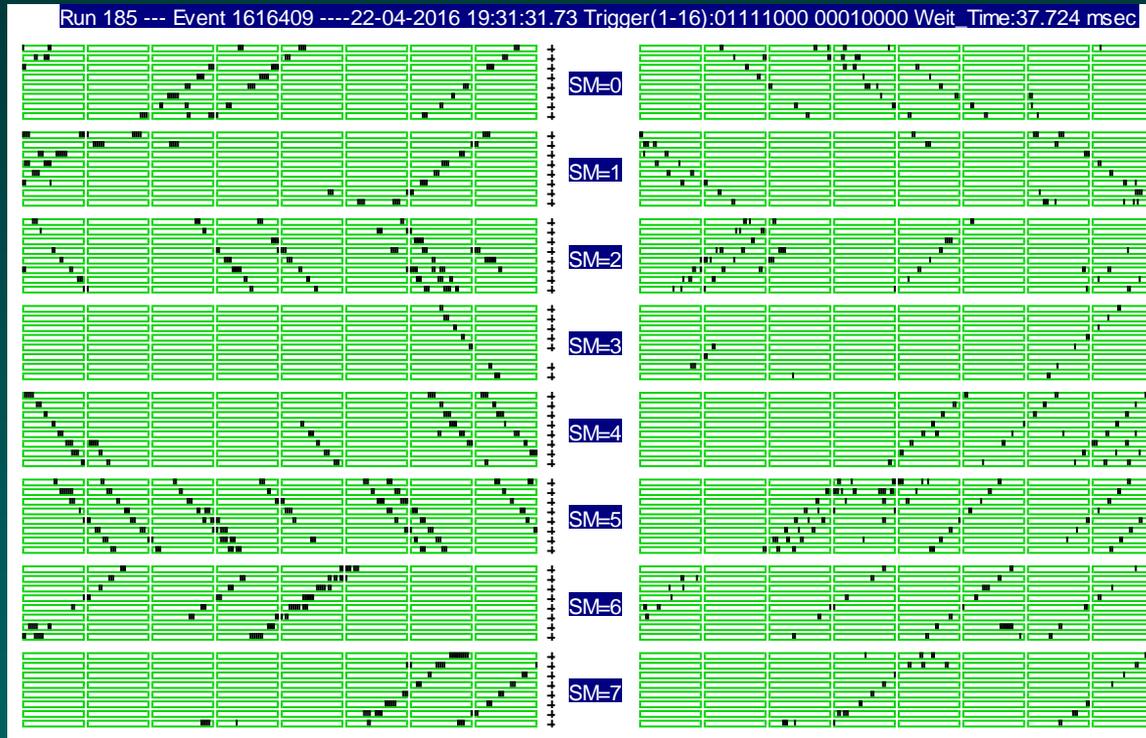


DECOR

8-layer supermodules
(SM) of streamer tubes.
Accuracy about 1 cm
and better than 1°.

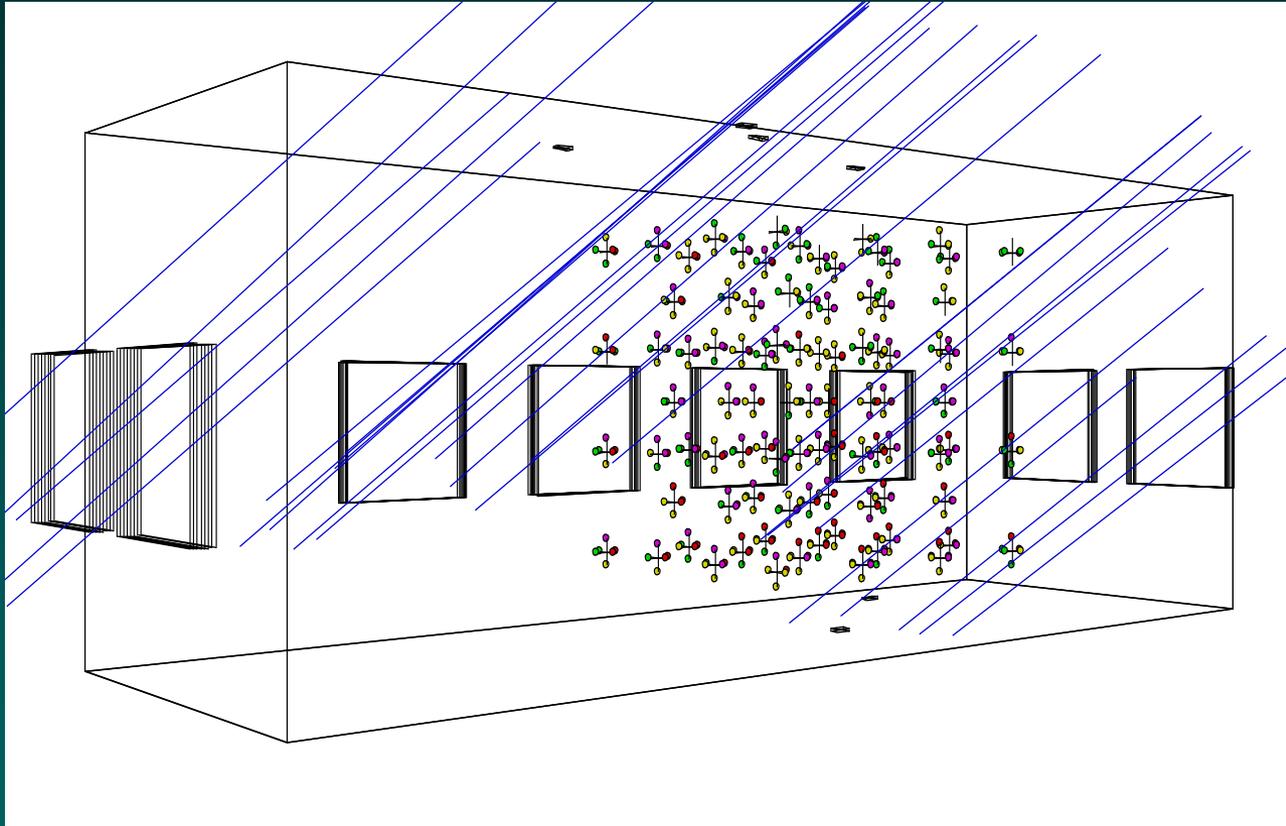


Response of DECOR coordinate-tracking detector for muon bundle event



SM5: X-view, Y-view

Geometry reconstruction and Cherenkov water detector response for muon bundle event



Local muon density in the event and EAS arrival direction are estimated from DECOR data, whereas the energy deposit is measured in the Cherenkov water calorimeter NEVOD.

Статистическая информация

Анализируются группы, содержащие не менее трех квазипараллельных частиц в трех разных супермодулях ДЕКОР

Типичная частота регистрации ~ 250 событий в час.

Медианный зенитный угол $\sim 42^\circ$ (90% событий от 21° до 65°).

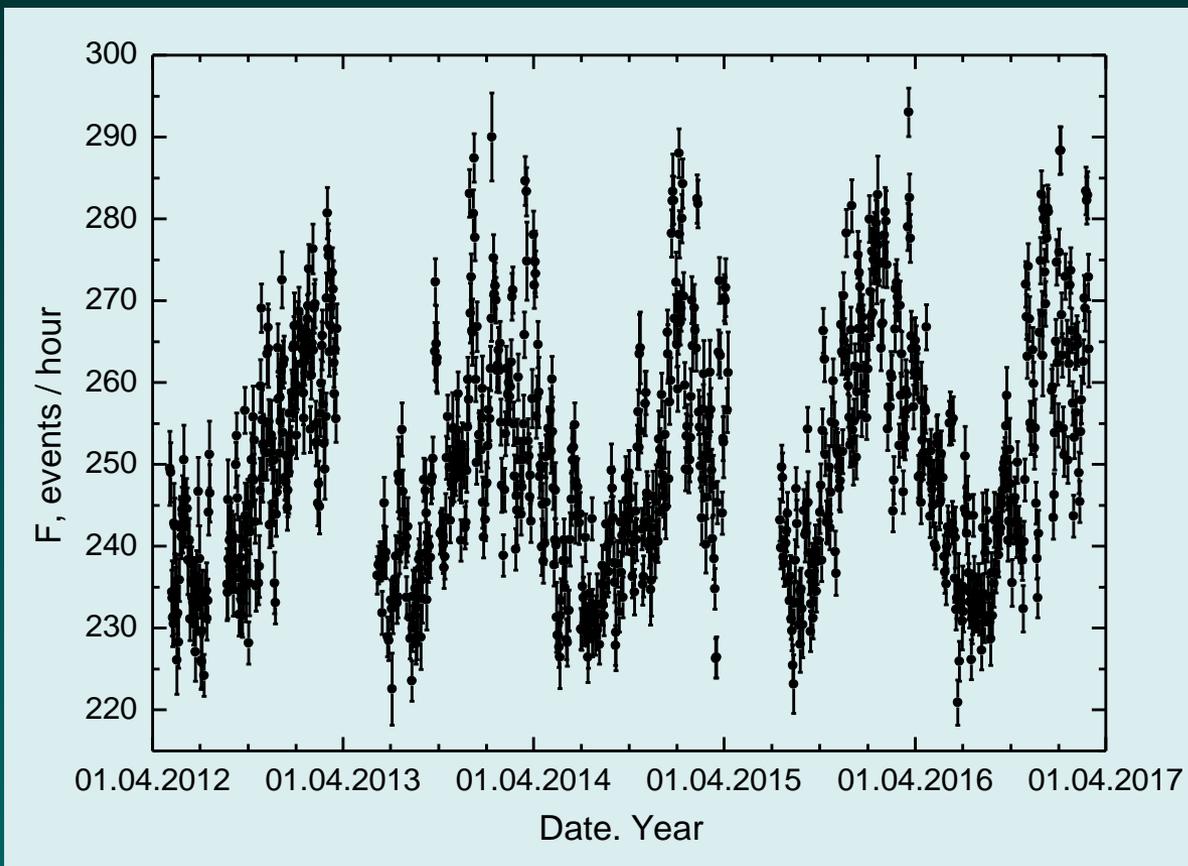
Энергии первичных частиц порядка 1 ПэВ и выше.

Три серии измерений:

- NAD10: 03.05.2012 - 20.03.2013
- NAD11: 05.06.2013 - 08.04.2015
- NAD12: 16.07.2015 - 28.02.2017

Всего: 939 наборов данных продолжительностью от 10 до ~ 40 часов живого времени наблюдений, 7.3 млн. групп, 29.2 тыс. часов

Изменения частоты регистрации групп за 5 лет наблюдений

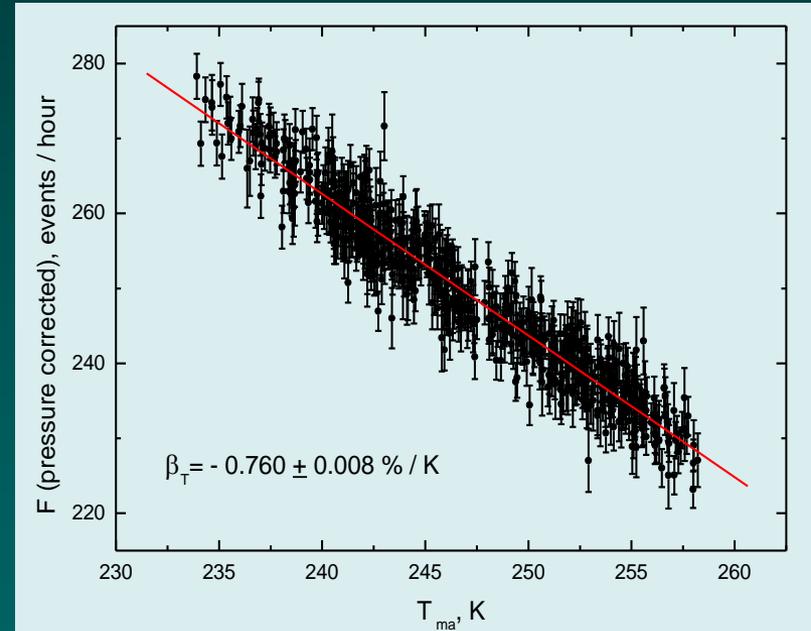
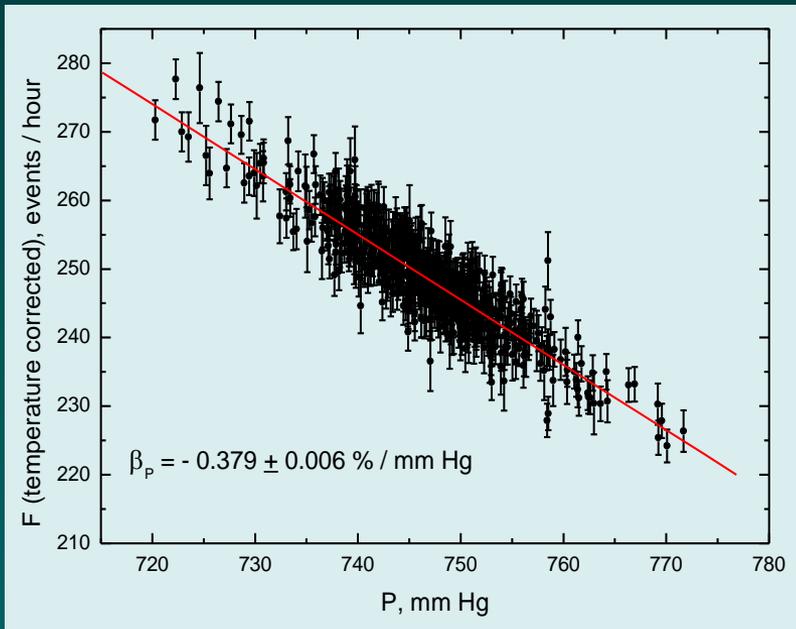


В среднем, интенсивность групп мюонов, регистрируемых зимой и летом, отличается более чем на 10%; максимальная интенсивность наблюдается во второй половине января, минимальная – в июле. Размах – до 25-30%.

БАРОМЕТРИЧЕСКИЙ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТЫ

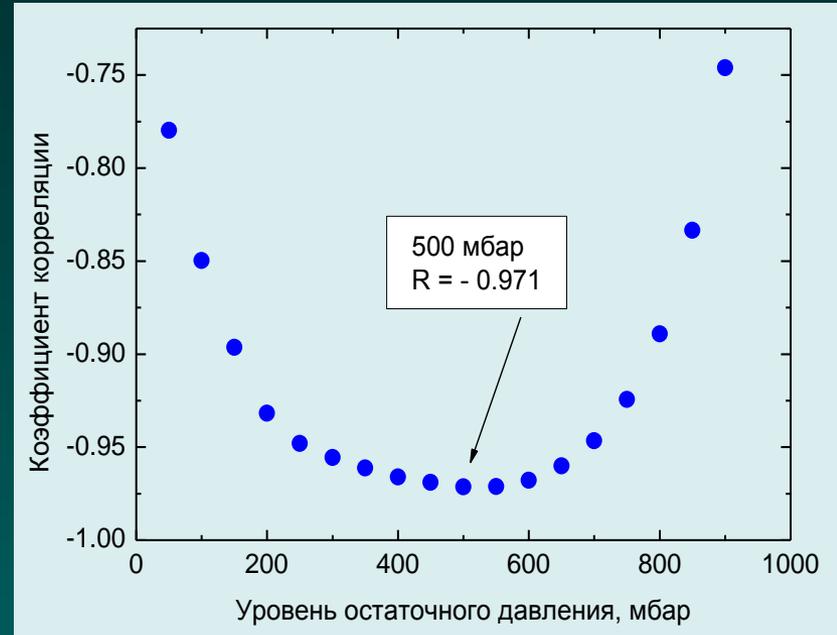
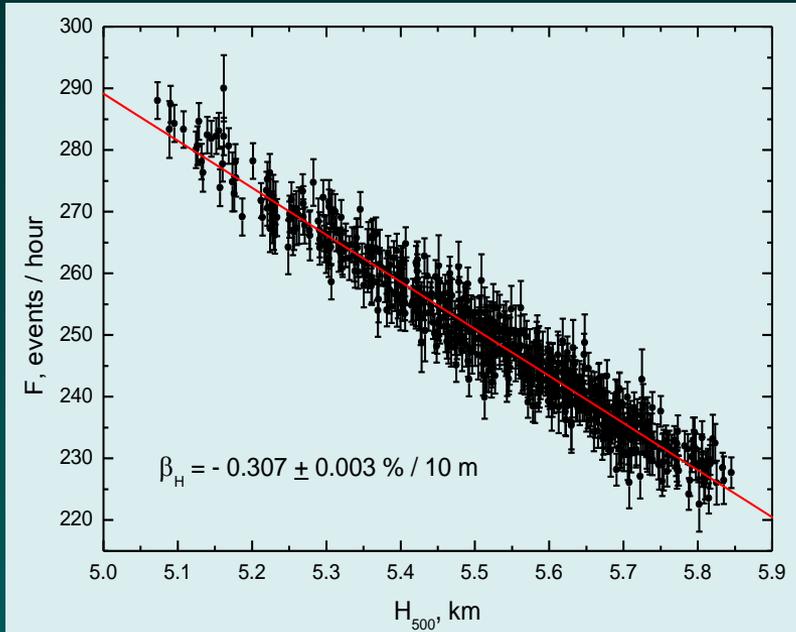
Совместная оценка барометрического и температурного коэффициентов (итерационно). Давление (P): собственный датчик НЕВОД; среднемассовая температура атмосферы (T_{ma}) сосчитана на основе данных из базы GDAS.

$$F = F_0 (1 + \beta_P \Delta P)(1 + \beta_T \Delta T); \Delta P = P - \langle P \rangle; \Delta T = T - \langle T \rangle$$



Величины коэффициентов неожиданно велики (в 2-3 раза больше, чем для одиночных мюонов). Учитывая, что средние энергии мюонов в составе групп составляют десятки ГэВ, объяснить эти эффекты в рамках обычных механизмов (потери энергии и изменение вероятности распада частиц) невозможно.

Корреляции интенсивности групп с высотой изобарических поверхностей



NB!!! В этом подходе вместо двух параметров состояния атмосферы (P , T_{CM}) используется один (высота изобарической поверхности H_{PRES} , данные GDAS).

Максимальные корреляции наблюдаются для остаточного давления 500 мбар ($\langle H_{500} \rangle = 5.53$ км); для уровней менее 300 и более 700 мбар корреляции быстро ослабевают. Это указывает на то, что большинство мюонов, регистрируемых в составе групп, образуются на высотах 3 – 9 км.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ВАРИАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГРУПП МЮОНОВ

Н.В.Толкачева и др. Изв. РАН.
Сер. физ. 2011. Т. 75. № 3

При отборе по локальной плотности мюонов,
спектр событий приближенно можно оценить:

$$F(\geq D) = N_0 D^{-\beta} \int [\rho(E_0, \mathbf{r})]^\beta dS$$

Здесь ρ – ФПР мюонов в ШАЛ,
 β – наклон интегрального спектра
локальной плотности мюонов.

Изменение эффективной высоты
формирования групп H относительно
средней величины $\langle H \rangle$ приводит к
масштабной трансформации ФПР
мюонов, и интенсивность событий
должна следовать закону:

$$F(\geq D) \sim (\langle H \rangle / H)^\alpha, \quad \alpha = 2(\beta - 1)$$

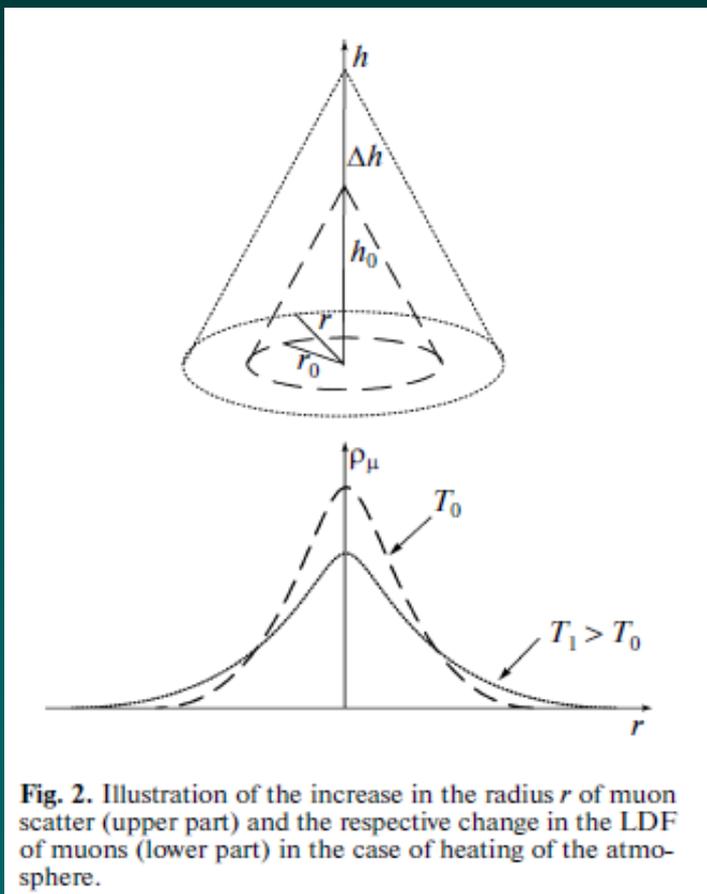


Fig. 2. Illustration of the increase in the radius r of muon scatter (upper part) and the respective change in the LDF of muons (lower part) in the case of heating of the atmosphere.

Сравнение предсказаний геометрического механизма с результатами измерений

Зависимость от эффективной высоты: $F \sim (\langle H \rangle / H)^\alpha$

Температурный эффект ($P = \text{const}$): $F \sim (\langle T \rangle / T)^\alpha$

Барометрический эффект ($T = \text{const}$): $F \sim [\ln(\langle P \rangle / P_L) / \ln(P / P_L)]^\alpha$

Экспериментальные оценки параметров вариаций интенсивности групп мюонов и предсказания геометрической модели (R.P. Kokoulin et al., J.Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 675. P. 032034):

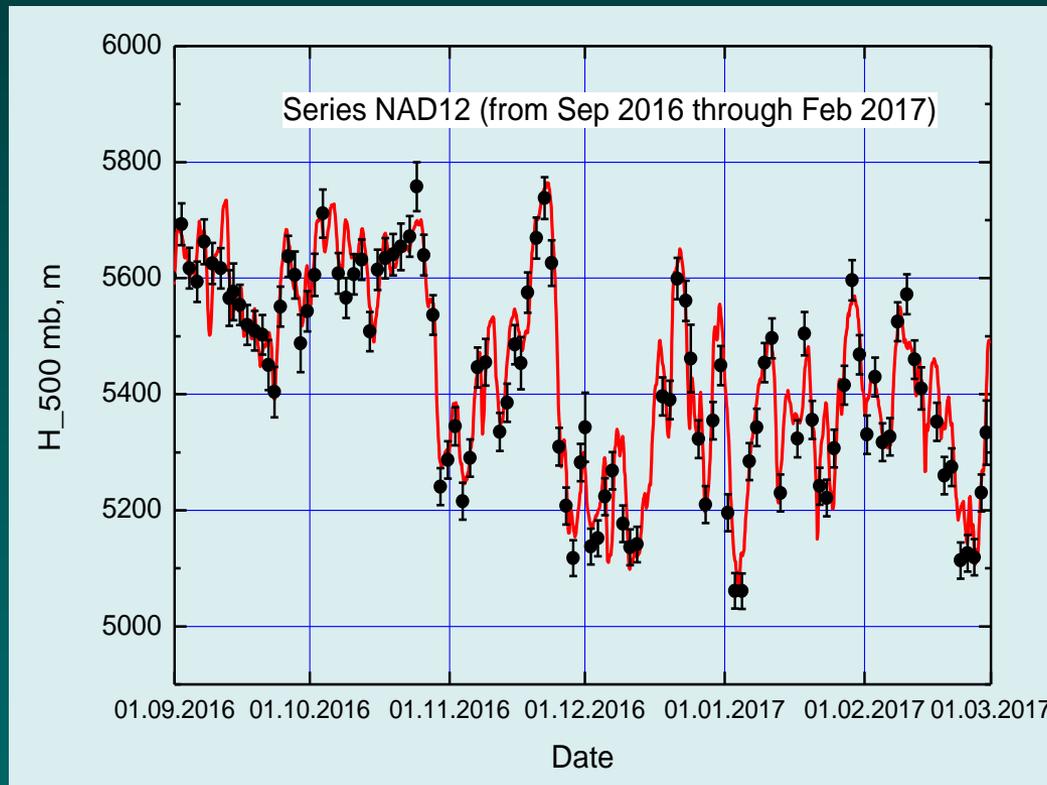
Параметр	Измеренная величина	Геометрическая модель
β_P , % / мм рт. ст.	- 0.382 ± 0.006	- 0.374 ± 0.008
β_T , % / К	- 0.760 ± 0.008	- 0.777 ± 0.016
β_{H500} , % / 10 м	- 0.303 ± 0.003	- 0.359 ± 0.007

Геометрическая модель механизма вариаций, связанная с изменениями эффективной высоты формирования групп и масштабной трансформацией функции пространственного распределения мюонов, качественно и количественно объясняет наблюдаемые величины метеоэффектов.

Вместо эпилога

По измеренным частотам регистрации групп мюонов в текущей серии (NAD12) рассчитаны «ожидаемые» значения высоты изобарической поверхности, соответствующей остаточному давлению 500 мбар. Использовались значения параметров, оцененные по данным предыдущих измерений (NAD10, NAD11):

$$H = H_0(F / F_0)^{-1/B}; H_0 = 5530 \text{ m}; F_0 = 248.6 \text{ h}^{-1}; B = 1.673$$



Точки: оценки ДЕКОР (типичная статистическая погрешность ~ 35 м, или ~ 0.6%);
кривая: независимые ретроспективные данные метеонаблюдений GDAS.

Спасибо за внимание