

МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРЫ АТМОСФЕРЫ НА РАЗНЫХ ВЫСОТАХ ПО УГЛОВОМУ СПЕКТРУ МЮОНОВ

О.В.Белоносова¹, А.В.Белов², В.В.Борог¹, А.С.Давыдов¹, Г.М.Крученицкий³, С.П.Перов³, В.Г.Янке²

¹Московский инженерно-физический институт (государственный университет)

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн

³Центральная аэрологическая обсерватория

Разработан и реализован метод непрерывного контроля изменения вертикального поля температуры от поверхности земли до стратосферных высот на фиксированных уровнях по вариациям спектра мюонов в широком диапазоне зенитных углов. Сопоставление с прямыми измерениями на шарах-зондах (полеты через 12-часовые отрезки времени) дает удовлетворительное согласие практически на всех 9-ти уровнях диапазона высот: от 900 до 100 мбар, с шагом 100 мбар. Методика проверена для различных времен года на 2-х недельных отрезках времени.

Введение

Дистанционное изучение поведения температуры на разных высотах атмосферы, с использованием метеорологической зависимости интенсивности космического излучения, было начато более 30 лет назад. В работе [1] применялось три установки с разными порогами по энергии частиц: нейтронный монитор и два детектора мюонов, регистрирующих останавливающиеся и проникающие мюоны. По флуктуациям интегральных спектров частиц получено поведение температуры на трех разных высотах в зависимости от времени. Результаты работы свидетельствовали о возможности раздельного учета барометрических и температурных эффектов:

$$\Delta N(t) / N = -\beta_T \Delta T - \beta_P \Delta P, \quad (1)$$

где $\Delta N(t)/N$ - временная вариация интенсивности частиц; ΔT и ΔP - изменения среднemasсовой температуры и полного давления на уровне наблюдения; β_T и β_P - усредненные температурный и барометрический коэффициенты. В работе [2] предложена методика, в которой с помощью одной установки, измеряющей спектр мюонов $N(\theta)$ в большом интервале зенитных углов θ , можно проследить за вариацией вертикального разреза температурного поля вплоть до стратосферных высот:

$$\delta N(h_0, \theta) / N(h_0, \theta) = \int_0^{h_0} (W_T(\Delta \epsilon, h, h_0, \theta) \delta T(h)) dh, \quad (2)$$

где: $W_T(\epsilon, h, h_0, \theta)$ – дифференциальный температурный коэффициент, зависящий от высоты слоя атмосферы h , зенитного угла θ вдоль траектории частиц и уровня наблюдения h_0 ; $\Delta \epsilon$ - энергетический порог регистрации мюонов. Если считать, что функция W_T априорно известна, то значения $T(h)$ можно найти из решения обратной задачи. Полномасштабно эта методика оставалась не реализованной более 30 лет, вплоть до настоящего времени.

Методика исследования

Для практического применения методики [2] использован годоскоп МИФИ [3] площадью 9 м^2 , который непрерывно измеряет угловой спектр мюонов $N(\theta, \varphi)$ в широком диапазоне зенитных и азимутальных углов: $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ и $0 \leq \varphi \leq 360^\circ$ с точностью $1-2^\circ$. Уровень наблюдения – $h_0 = 1030 \text{ г/см}^2$ под фильтром, толщиной 2 мвэ; энергетический порог

регистрации $\Delta\varepsilon \approx 400$ МэВ. Для этих условий имеются рассчитанные значения величин $W_T(\varepsilon, h, h_0, \theta)$ [2]. В дальнейшем они будут обозначаться как $W_T(h, \theta)$. При решении задачи вся атмосфера условно разбивается на отдельные геопотенциальные слои толщиной $\Delta h = 100$ г/см², в которых проводится оценка флуктуаций ΔT . Выражение (2) для разных углов преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений, где интегрирование заменяется суммированием по различным слоям атмосферы толщиной Δh :

$$\begin{cases} \Delta N(\theta_1) / N(\theta_1) - \beta_p \Delta P = W_T(h_1, \theta_1) \Delta T(h_1) \Delta h_1 + \dots + W_T(h_m, \theta_1) \Delta T(h_m) \Delta h_m \\ \dots \\ \Delta N(\theta_n) / N(\theta_n) - \beta_p \Delta P = W_T(h_1, \theta_n) \Delta T(h_1) \Delta h_1 + \dots + W_T(h_m, \theta_n) \Delta T(h_m) \Delta h_m \end{cases} \quad (3)$$

Индекс m соответствует отдельному слою атмосферы, n – диапазону зенитных углов. В систему (3) введена интегральная поправка на учет барометрического эффекта в среднем, где $\beta_p = 0.15\%$ мбар⁻¹. Значения P ежеминутно измерялись с точностью 0,1 мбар.

Экспериментальные данные $N(\theta)$ были сгруппированы по углам так, чтобы, во-первых, отдельные угловые интервалы не "соприкасались" между собой. Это возможно уменьшит влияние соседних слоев атмосферы друг на друга и снизит корреляционный эффект в уравнениях (3). Во-вторых, значения $N(\theta)$ должны иметь приблизительно равную величину во всех интервалах, что обеспечивает одинаковую статистическую точность результатов. Для увеличения точности угловые спектры мюонов берутся за 2-х часовые интервалы времени. Величины $N(\theta)$ получены суммированием распределения $N(\theta, \varphi)$ по углу φ в пределах 360° , из-за отсутствия азимутальной зависимости углового спектра мюонов при высокой энергии [3].

Результаты и обсуждение

В эксперименте, в режиме реального времени изначально регистрируются 1-минутные матрицы пространственного распределения интенсивности мюонов $N_{ik}(t)$, где каждой паре индексов (ik) соответствует значение углов (θ, φ) с разрешением 1-2 градуса [4]. Поэтому выборка $N(\theta)$ для каждого интервала $\Delta\theta = \theta_{n+1} - \theta_n$ получается из кольца матричных данных N_{ik} . На рис.1 приведен фрагмент матрицы и расположение одного из таких колец. Видно, что практически все ячейки, находящиеся на границах кольца, входят в него лишь частично. В этом случае, число мюонов из пограничной ячейки берется пропорционально площади, попадающей в кольцо.

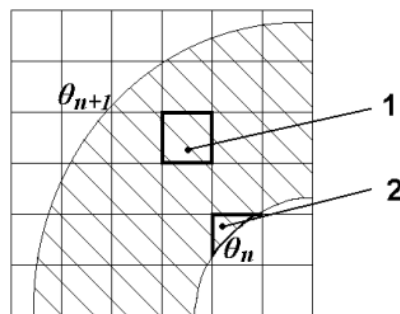


Рис.1. Схема учета интенсивности мюонов для разных ячеек матрицы. Заштрихованная область – фрагмент кольца с множеством ячеек для интервала углов $\theta_{n+1} - \theta_n$. 1 – внутренняя ячейка кольца (интенсивность учитывается полностью), 2 – пограничная ячейка (интенсивность пропорциональна заштрихованной части площади ячейки).

Всего рассматривалось 9 слоев атмосферы, средняя высота которых $h = 900, 800, \dots, 100$ г/см². Было взято 10 угловых интервалов по зенитным углам. Ниже (табл.)

приведены отдельные интервалы углов, их средние значения и характерная 2-х часовая статистика счета мюонов. Ширина всех интервалов, за исключением первого, составляла 3° , а угловые расстояния между соседними интервалами были равны 2° .

Таблица. Зависимость интенсивности мюонов $N(\theta)$ от интервалов зенитных углов θ .

Номер Интервала	Интервал углов $\Delta\theta$, градус	Средний угол $\langle\theta\rangle$, градус	средняя статистика, $N(\theta)$
1	0 – 7	3,5	104580
2	9 – 11	10	89460
3	14 – 16	15	116200
4	19 – 21	20	133530
5	24 – 26	25	141900
6	29 – 31	30	137280
7	34 – 36	35	119480
8	39 – 41	40	103250
9	44 – 46	45	78130
10	49 – 51	50	53520

Система линейных уравнений (3) преобразовывалась для определения значений $\Delta T(h)$. Поскольку число неизвестных (ΔT) меньше числа уравнений (по угловым интервалам θ), то система решалась методом наименьших квадратов. На рис.2 приведены результаты определения вариаций температуры атмосферы $\Delta T(h)$ для двух стратосферных высот (100 и 200 мбар) за 2-х недельный период непрерывных измерений. В это время магнитное поле Земли было достаточно спокойным и не требовалось учитывать магнитосферные поправки, влияющие на интенсивность мюонов.

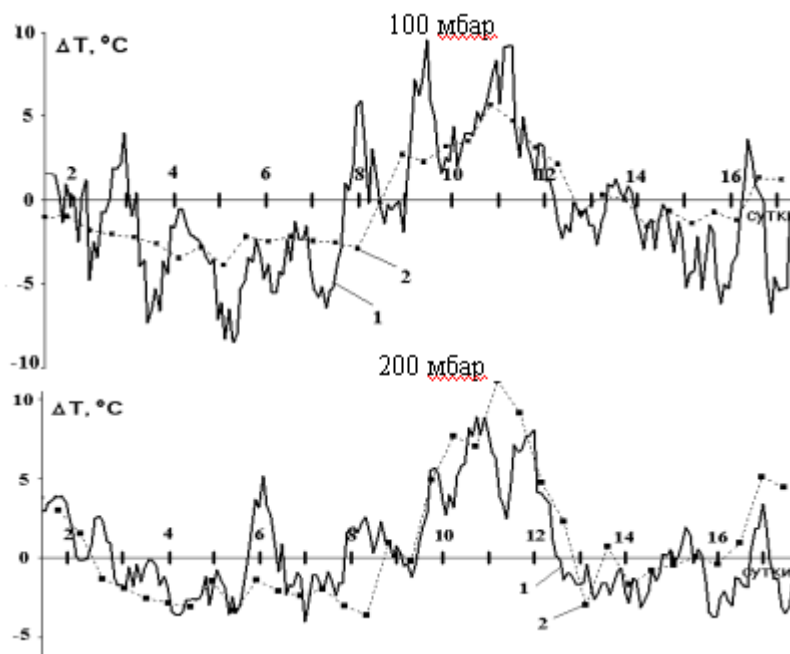


Рис.2. Вариации температурного поля на геопотенциальных уровнях стратосферы: 100, 200 мбар. Сплошная линия (1) - данные, полученные по вариациям углового спектра мюонов за 2-часовые интервалы и сглаженные методом скользящего среднего. Пунктирная линия с точками (2) - прямые измерения температуры с помощью шаровозондов через 12-ти часовые интервалы. Ось x – календарное время (в сутках) с 15 по 31 мая 1998 г. Ось y – изменения температуры (градус) на фиксированных высотах.

Прямые измерения температурного поля получены с помощью шаров-зондов, регулярно запускаемых ЦАО Росгидромета в Долгопрудном (ближнее подмосковье). Полеты совершались регулярно дважды в сутки (00 и 12 часов по UT).

На рис.3 приведены аналогичные результаты по вариациям температурного поля для того же временного отрезка, относящиеся к тропосфере (глубина 600 и 900 мбар).

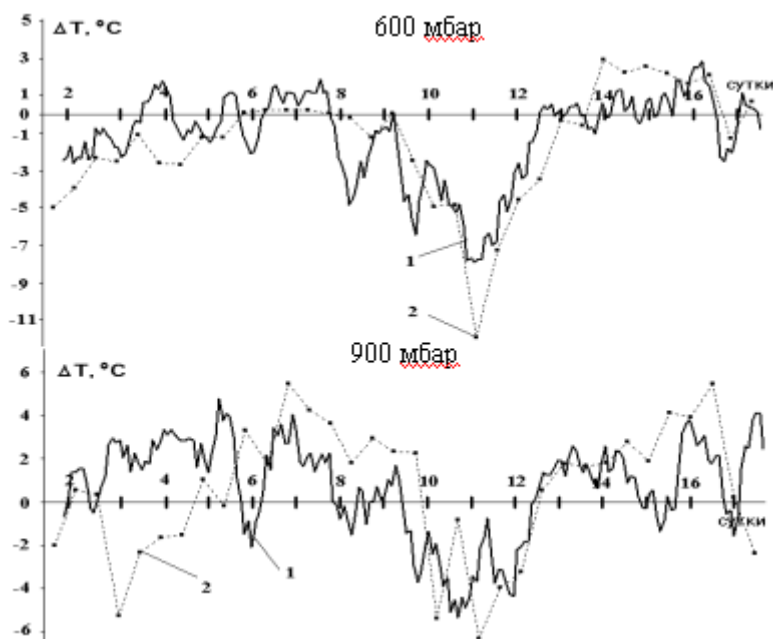


Рис.3. Вариации температурного поля на двух уровнях тропосферы: 600 и 900 мбар. (1) - данные, полученные по вариациям углового спектра мюонов. (2) - прямые измерения температуры с помощью шаров-зондов. Ось x – календарное время с 15 по 31 мая 1998 г. Ось y – изменения температуры (градус).

Сопоставление динамики температурного поля на всех других высотах (300, 400, 500, 700 и 800 мбар) дает аналогичное согласие с прямыми измерениями. В глубине атмосферы (800, 900 мбар) расхождение увеличивается. Для проверки устойчивости результата были изменены условия обработки - между соседними угловыми интервалами исключался промежуток. Результаты по ΔT изменяются мало. При обработке данных интенсивность мюонов не исправлена на модуляцию потока первичного космического излучения.

Заключение

Впервые показано практически, что прецизионные измерения дифференциального углового спектра мюонов в широком диапазоне углов позволяют проводить непрерывный мониторинг вертикального поля температуры атмосферы вплоть до стратосферных высот.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 03-02-17313, 02-05-64790), на уникальной установке "Мюонный годоскоп" (рег. № 06-11, Минпромнаука РФ).

Список литературы

1. Y. Miyazaki, M. Wada // Acta phys. Acad. Sient. Hung. 1970. V.29. Suppl. 2. P. 591.
2. Л.И.Дорман // Метеорологические эффекты космических лучей. АН СССР. М. 1972.
3. В.В.Борог и др. // Изв. РАН. 1997. Сер. физ. Т.61. № 6. С.1256.
4. В.В. Борог и др. // Изв. РАН. 2003. Сер. физ. Т.67. №4. С.515.