

## Температурный эффект мюонной компоненты и практические вопросы его учета в реальном времени.

М.Д. Беркова<sup>1,2</sup>, А.В. Белов<sup>1</sup>, Е.А. Ерошенко<sup>1</sup>, В.Г. Янке<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН); [yanke@izmiran.ru](mailto:yanke@izmiran.ru)

<sup>2</sup> Институт прикладной механики РАН (ИПРИМ РАН); [qvark8@yandex.ru](mailto:qvark8@yandex.ru)

### Аннотация

Разработана методика исключения температурного эффекта мюонной компоненты космических лучей (КЛ) в режиме реального времени с привлечением глобальных атмосферных моделей. Методика была применена к данным мюонных детекторов, доступным в реальном времени. Показано, что достигаемая точность при таком подходе достаточна для исследования всех классов вариаций.

### Введение

Широкое использование мюонных детекторов при исследовании вариаций космических лучей сдерживается присутствием большого температурного эффекта, присущего мюонной компоненте вторичного космического излучения. Для исключения такого эффекта необходимы данные аэрологического зондирования вблизи пункта расположения детектора, которые должны проводиться с необходимым временным разрешением и регулярностью. Отсутствие таких данных приводит к тому, что только частично удается исправлять данные мировой сети мюонных телескопов (Nagoya, Hobart, Sao Martinho и Kuwait) [1]. Поэтому вместо экспериментально полученных данных о температурном распределении в атмосфере эффективнее использовать данные глобальных атмосферных моделей. Такие модели создаются с помощью обобщенных метеорологических данных и позволяют получить температурный ход в атмосфере в любом пункте и в любой момент времени [2].

Такой подход реализован в ряде работ [3-6, 16]. Так, в работе [3] исследовался температурный эффект нейтронной компоненты КЛ с привлечением данных метеорологических моделей. В работе [4], используя вертикальные профили температуры на стандартных изобарических уровнях, взятые из метеорологической модели, были исправлены ретроспективные часовые данные для 17 направлений телескопа Nagoya, данные 3-х направлений телескопа Якутск, данные ионизационных камер Якутск и Пекин за весь период наблюдений корректным интегральным методом. Температурный эффект мюонных детекторов нейтринной обсерватории Южный полюс исследовался в работе [5]. С помощью приближенных методов эффективного уровня генерации и среднемассовой температуры для подземных детекторов получен температурный коэффициент  $+0.901 \text{ \%}/\text{C}$ , для наземных  $-0.360 \text{ \%}/\text{C}$ . В работе [6] исследовался температурный эффект мюонных детекторов обсерватории MINOS, регистрирующей мюоны с энергией  $>700 \text{ GeV}$ . Для температурного коэффициента получено  $+0.874 \pm 0.009 \text{ \%}/\text{C}$ .

В настоящее время такие атмосферные модели работают уже в режиме реального времени, и одной из задач настоящей работы является разработка математических и программных средств для запроса данных моделей и исключения температурного эффекта в реальном времени. Другой целью работы является сравнение методов исключения температурного эффекта: интегрального и приближенных альтернативных методов.

## 1 Температурный эффект мюонной компоненты

Температурный эффект мюонной компоненты обусловлен конкуренцией распада и взаимодействия с ядрами воздуха пионов и мюонов. При нагревании и, соответственно, расширении атмосферы поток мюонов как уменьшается (отрицательный температурный эффект), так и увеличивается за счет дополнительного распада пионов (положительный температурный эффект). При энергиях, характерных для наземных детекторов, доминирует отрицательный температурный эффект, а при энергиях, характерных для подземных детекторов, доминирует положительный температурный эффект, поскольку вероятность распада мюонов столь больших энергий мала. Для учета температурного эффекта разработан интегральный метод, позволяющий учесть температурные вариации с необходимой

точностью. Однако, он требует привлечения часовых данных высотного хода температуры в атмосфере, что часто является неразрешимой задачей. Но существуют и альтернативные эмпирические методы.

*Метод эффективного уровня генерации* разработан ранее других, но применяется по настоящее время. Метод базируется на предположении, что мюоны генерируются в основном на определенном изобарическом уровне (обычно принимаемом за 100 mb), высота  $H$  которого изменяется с изменением температурного режима атмосферы. Изменение интенсивности мюонной компоненты, согласно [7,8], коррелирует с изменениями высоты уровня генерации  $\delta H$  и температуры воздуха  $\delta T$  этого слоя, а именно

$$\delta I_T = \alpha_H \delta H + \alpha_T \delta T, \quad (1)$$

где  $\alpha_H$  (%/km), так называемый коэффициент распада, – отрицательный эффект, а  $\alpha_T$  – положительный температурный коэффициент. Как правило, высота уровня 100 mb измеряется два раза в сутки. Если же известна высотная зависимость  $T(h)$ , то высота  $H$  определяется барометрической формулой,

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu g}{R} \int_0^H \frac{dh}{T(h)}\right). \quad (2)$$

Здесь  $P_0$  – давление на уровне наблюдения,  $P$  – давление на высоте  $H$ ,  $\mu$  – молекулярный вес газа и  $R$  – универсальная газовая постоянная. Этот метод, тем не менее, требует высотного зондирования. Поэтому логично применять физически ясный и полностью разработанный интегральный метод, который в теоретическом плане полностью позволяет решить проблему исключения температурных вариаций.

*Интегральный метод* развивался многими авторами, но особенно детально он представлен в работах [9] и [10]. Вариации, обусловленные атмосферным температурным эффектом, на основе интегрального метода, определяются как

$$\delta I_T = \int_0^{h_0} \alpha(h) \cdot \delta T(h) \cdot dh, \quad (3)$$

где  $\delta I_T$  – вариация, обусловленная температурным эффектом космических лучей,  $\delta T(h)$  – вариации температурного хода в атмосфере, которые определяются как отклонение текущего хода от температурного хода в атмосфере в базовый период  $B$ :  $\delta T(h) = T_B(h) - T(h)$ . Плотности температурных коэффициентов  $\alpha(h)$  различных детекторов были получены расчетным путем, и в данной работе использовались те же  $\alpha(h)$ , что и в нашей предыдущей работе [4].

*Метод среднemasсовой температуры* базируется на определении среднemasсовой температуры в атмосфере. Т.к. плотность температурного коэффициента  $\alpha(h)$  для наземных детекторов не сильно изменяется с глубиной атмосферы  $h$ , то за знак интеграла можно вынести среднее значение  $\bar{\alpha}(h)$ , т.е.

$$\delta I_T = \bar{\alpha} \int_0^{h_0} \delta T(h) \cdot dh = \bar{\alpha} \cdot \delta T_m, \quad (4)$$

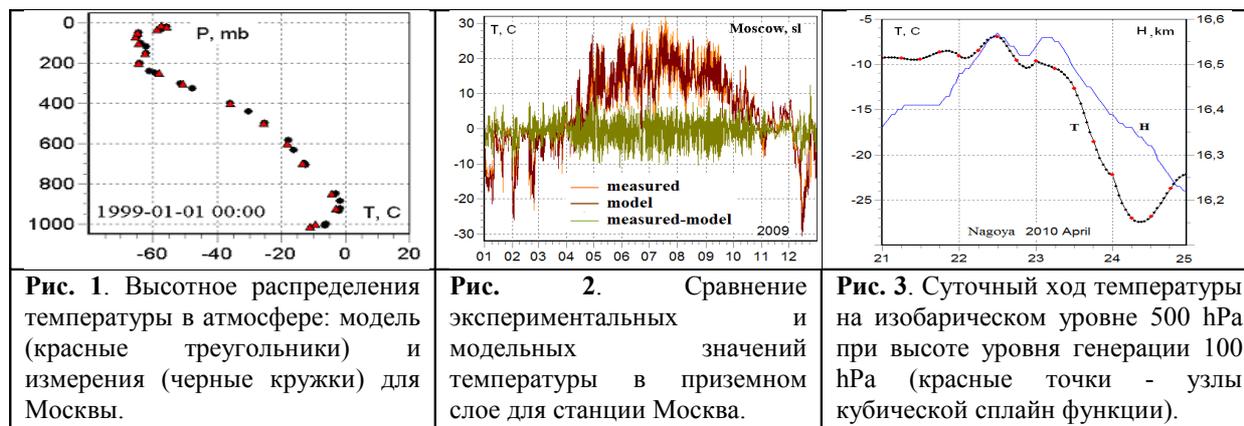
где  $T_m$  – среднemasсовая температура. Здесь предполагается, что температура в пределах каждого слоя принимает некоторое среднее значение  $T_n^*$ ,  $L_{skin}$  – номер приземного слоя. Это было отмечено в работе [11], и использовалось в ряде последующих работах [5,6,12]. Для определения среднemasсовой температуры также необходимо привлекать данные температурного зондирования. Однако среднemasсовую температуру можно определить экспериментально (без аэрологических данных) при решении системы спектрографических уравнений, описывающих вариации нескольких нейтронных и мюонных детекторов [11].

## 2 Температурные данные

На основе обобщенных данных в метеорологии строятся модели, которые позволяют получить температурный ход в атмосфере как ретроспективно, так и в режиме прогноза. В данной работе используются данные температурного моделирования Глобальной прогностической системы (GFS - Global Forecast System), представляемые Национальным центром прогноза состояния окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction — NCEP, США) [13]. GFS модель позволяет получать как ретроспективные, так и прогностические данные трехмерного поля температуры. GFS модель содержит полный набор параметризации физических процессов (подробнее можно ознакомиться на сайте [14]. Режим реального времени обеспечивается прогнозом на текущие сутки.

Точность таких данных определяется до нескольких градусов в зависимости от изобарического уровня. На рис. 1 приводится сравнение распределения температуры в атмосфере, полученное в соответствии с моделью и непосредственно измеренное для метеостанции Москва (Метео-27612)].

Анализ показывает, что распределение разности экспериментально измеренных и модельных значений приблизительно подчиняется гауссовскому распределению с достаточно хорошим значением  $\sigma=0.26$  C°. Наибольшую ошибку следует ожидать для уровня наблюдения, поскольку в нижнем слое температура наиболее изменчива. Так, для разности часовых значений экспериментальных и модельных данных температуры в приземном слое для Москвы уже  $\sigma=2.8$  C°. Оценить возможные ошибки позволяет рис. 2.



Выходными данными модели является температура на 17 изобарических уровнях: уровень наблюдения, 1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa для четырех моментов времени 00, 06, 12 и 18 часов ежедневно. Данные интерполированы на сетке с разрешением  $1^\circ \times 1^\circ$ . Для получения данных с часовой скважностью проводилась интерполяция кубическим сплайном [15] по пяти узловым точкам. На рис.3 показан пример интерполяции для суточного температурного хода на изобарическом уровне 500 hPa и высоты уровня генерации 100 hPa. Для введения температурных поправок в данные детекторов, поступающие в реальном времени, использовалось высотное распределение температуры, полученное как прогноз на текущий день.

В настоящее время данные мировой сети мюонных телескопов исправляются на температурный эффект методом эффективного уровня генерации [1]. Для этого используются получаемые дважды в сутки в ближайших аэропортах данные радиозондирования эффективной высоты уровня генерации 100 hPa, которые интерполируются для получения данных с часовой скважностью. Таким методом удалось исправить только 25% данных, поскольку в других случаях отсутствовали данные радиозондирования. Кроме того, использовалась неполная корреляционная модель (1), которая учитывает только первое слагаемое, что увеличивает ошибки особенно для зимнего периода.

Привлекая данные температурного моделирования Глобальной прогностической системы - GFS для часовых данных мюонных телескопов, нами была разработана и реализована методика учета температурного эффекта в реальном времени. Разработанная методика применена для обработки данных, доступных в реальном времени для телескопов: Nagoya (17 направлений), Якутск на уровне моря (3 направления), Якутск на уровне 7 м в.э. (3 направления), YangBaJing на Тибете (9 направлений) и Москва (15 направлений). Сравнение результатов, полученных по данным прямого зондирования высотного хода температуры и полученных по данным GFS модели, позволяет утверждать, что предлагаемый подход хорошо решает поставленную задачу. Расхождение между результатами прогноза на текущий момент и результатами GFS модели составляет максимум несколько градусов вблизи уровня моря, что вполне достаточно для требуемой точности. Результаты для вертикального температурного профиля и температурные поправки доступны по адресу [ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY/FTP\\_METEO/](ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY/FTP_METEO/), а данные всех телескопов, освобожденные от влияния температурного эффекта можно найти по адресу [ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY/FTP\\_TEL/](ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY/FTP_TEL/). Запрос по температурному распределению выполняется в начале каждого суток, реализуя режим прогноза на текущие сутки. Температурные поправки в интегральном приближении и в приближении среднemasсовой температуры вычисляются с учетом конкретной геометрии телескопов также в режиме прогноза. Все данные публикуются для часового и среднесуточного интервала усреднения.

### 3 Данные непрерывного мониторинга космических лучей

В реальном времени нам были доступны данные 4 мюонных детекторов. Это сцинтилляционные супертелескопы Nagoya (17 направлений) и YangBaJing (9 направлений), счетчиковые телескопы Якутск на уровне моря (5 направлений) и на уровне 7 mwe (5 направлений), счетчиковый телескоп Москва (15 направлений) прихода частиц). Кроме того, нам были предоставлены данные счетчикового телескопа Новосибирск для 5 направлений прихода частиц.

## 4 Обсуждение результатов

Результат исключения температурных вариаций по описанной выше методике приведен на рис.4 для всех телескопов, данными которых мы располагали в реальном времени. Рассматривались часовые вариации относительно базы за 2009 год. На каждом из рисунков приведены исходные неисправленные данные для вертикального направления (синяя кривая), поправка на температурный эффект интегральным методом (коричневая кривая) и поправка на температурный эффект методом среднемассовой температуры (оранжевая кривая). Исправленные интегральным методом данные показаны красным цветом, и они сравниваются с вариациями экваториального нейтронного монитора Thailand ( $R_c=17$  ГВ). Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1) Для всех станций поправка на температурный эффект, полученная методом среднемассовой температуры, является очень хорошим приближением и практически совпадает с поправкой, полученной интегральным методом. Для телескопа Nagoya приведена также поправка, найденная методом эффективного уровня генерации (зеленая кривая). В зимний период разногласие особенно большое.

2) Исправленные данные для телескопа Nagoya (вертикаль) хорошо согласуются с вариациями нейтронного монитора Thailand (черная кривая).

3) Для остальных рассматриваемых телескопов согласие несколько хуже. Связано это, в первую очередь, с их худшей статистикой и нестабильностью работы. Возможно, требуется некоторое уточнение плотностей температурных коэффициентов, учитывающее детали геометрии детекторов.

4) На тибетском мюонном телескопе наблюдаются очень большие сезонные вариации, в 4-5 раз превышающие вариации, наблюдаемые на других детекторах. Возможно, дополнительно имеет место локальный аппаратурный температурный эффект.

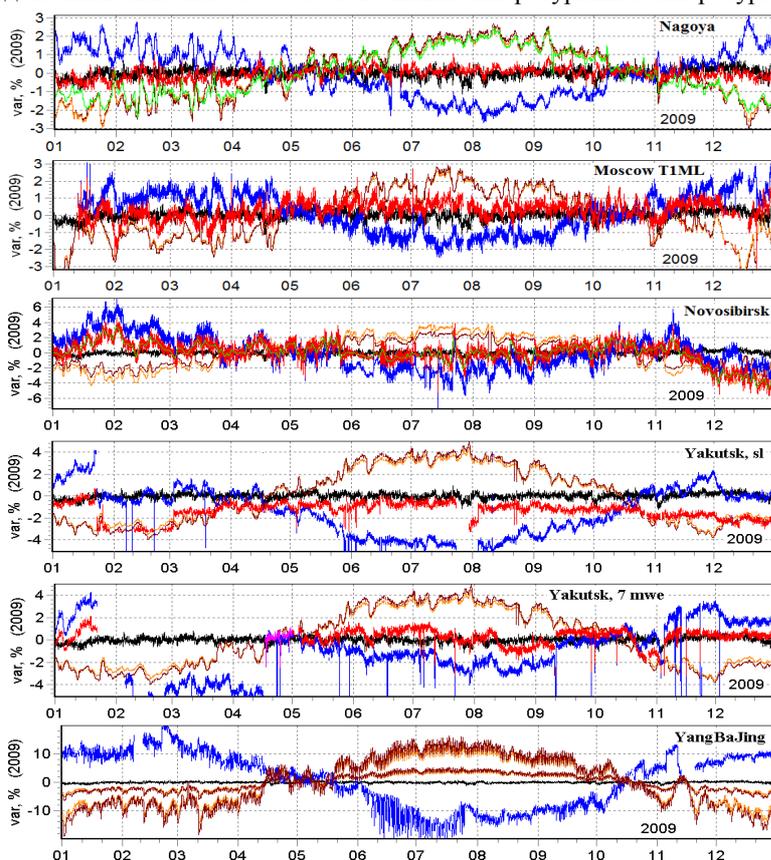


Рис. 4.

для детекторов на уровне моря дает гораздо лучшие результаты, несмотря на то, что все слои атмосферы учитываются с равным весом (4). Приведенный на рис. 5с экспериментальный температурный коэффициент для вертикального телескопа в пределах ошибок совпадает с рассчитанным коэффициентом и характеризуется также сильной корреляционной связью.

Таблица 1. Мюонный телескопы мировой сети.

name	k
Nagoya	17
Hobart	13
Sao Martinho	17
Kuwait	13
Якутск, уровень моря	3
Якутск, уровень 7 м в.э.	3
YangBaJing, Тибет	9
Новосибирск	5
Москва	15
Yerevan 2000	9
Greifswald	9
Mawson	5

Остановимся на точности учета температурного эффекта альтернативными методами. На рис. 5 приведена корреляционная кривая для вариаций вертикального мюонного телескопа с высотой изобарического слоя 100 hPa и корреляционная кривая вариаций вертикального телескопа с температурой в слое 100 hPa. Ясно, что изобарический слой 100 hPa выбран несколько условно. Он, в конечном счете, определяется эффективной энергией телескопа. Как видно из рис. 4, метод эффективного уровня генерации для телескопа Nagoya не полностью исключает температурные вариации, особенно в зимний период. Возможно, необходимо усложнить модель включением члена, учитывающего изменение температуры на изобарическом слое 100 hPa согласно (1).

Метод среднемассовой температуры, по крайней мере,

## 5 Выводы

1) Вертикальные профили распределения температуры в атмосфере, найденные по данным модели атмосферы, позволяют с требуемой точностью исключать температурный эффект из часовых данных наблюдений мюонных телескопов в реальном времени. 2) По описанной выше методике введены поправки на температурный эффект для всех мюонных телескопов, данные которых доступны в цифровой форме в реальном времени. Исходные и исправленные данные (часовые и среднесуточные) можно найти по адресу [ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/CosRay!/FTP\\_TEL/](ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/CosRay!/FTP_TEL/). 3) Данные высотного распределения температуры в атмосфере для каждого часа для всех рассмотренных пунктов, также доступны по адресу [ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/CosRay!/FTP\\_METEO/](ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/CosRay!/FTP_METEO/). Здесь же в реальном времени публикуются поправки на температурный эффект всех телескопов мировой сети с учетом их конкретной геометрии. Поправки приведены к базе 2009 года. 4) Кроме того, разработан Интернет-проект с подробным описанием Мировой сети мюонных детекторов и их основных характеристик, доступный по адресу <http://cr0.izmiran.ru/GlobalMuonDetectorNetwork>.

Работа выполнена при частичной поддержке Программой №6 президиума РАН “Нейтринная физика и астрофизика”

## Список литературы

- [1] Okazaki Y., Fushishita A., Narumi T. *et al.* Drift effects and the cosmic ray density gradient in a solar rotation period: First observation with the Global Muon Detector Network (GMDN). // The Astrophysical Journal. July, 2008. № 681. P. 693–707.
- [2] NOAA, <http://spidrd.ngdc.noaa.gov/class> или <http://phoenix.wdcb.ru/class> или <http://ideas.ngdc.noaa.gov/ideas>.
- [3] Belov A.V., Dorman L.I., Gushchina R.T., Yanke V.G. Temporal and latitude dependence of the temperature effect for neutron component of cosmic rays. // Proc. 24-th ICRC., Rome, Vol. 4, pp. 1141-1144, 1995; А.В.Белов, Р.Т.Гущина, В.Г.Янке. // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. № 2. С. 100.
- [4] Berkova M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V. Temperature effect of the muon component of cosmic ray and practical possibilities its accounting. // Proceedings of the 21<sup>st</sup> ECRS. 123 - 126. 2008.
- [5] Tilav S. *et al.* for the IceCube Collaboration. Atmospheric Variations as observed by IceCube. // Proceedings of the 31<sup>st</sup> ICRC, ŁODZ, 2009.
- [6] Adamson P. *et al.* for the MINOS Collaboration. Observation of muon intensity variations by season with the MINOS far detector. // Phys.Rev. 2010. D81:012001.
- [7] Blackett P.H. On the instability of the barytron and the temperature effect of cosmic rays. // Phys. Rev. 1938. V.54. P. 973-974.
- [8] Duperier A., A New Cosmic-Ray Recorder and the Air Absorption and Decay of Particles. // Terrest. Magn. Atmospheric Electricity. 1944. № 49. P. 1-7; Duperier A., The Meson Intensity at the Surface of the Earth and the Temperature at the Production Level. // Proc. Phys. 1949. Soc. 62. P. 684-696.
- [9] Дорман Л.И., Метеорологические эффекты космических лучей. М., Наука, с. 211, 1972
- [10] Maeda K. and M. Wada. Atmospheric temperature effect upon the cosmic ray intensity at sea level. // J. Sci. Res. Inst., Tokyo. 1954. 48. P. 71-79; K. Maeda: Journal Atm. Ter. Phys. 1960. № 19. P. 184.
- [11] Дворников В.М., Крестьянников Ю.Я., Сергеев А.В. Определение среднемассовой температуры атмосферы по данным интенсивности КЛ. // Геомагнетизм и аэрономия. 1976. Т. 16. № 5. С. 923-925.
- [12] Yanchukovsky V., Filimonov G., Hisamov G. Atmospheric Variations in Muon Intensity for Different Zenith Angles. // ISSN 1062-8738, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2007. 71. №. 7. P. 1038–1040.
- [13] NCEP, <http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>; погодный сервер, <http://esse.wdcb.ru>; температурный профиль атмосферы в реальном времени, <http://phoenix.wdcb.ru>
- [14] NOAA, <http://www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/moorthi/gam.html>
- [15] Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. Изд-во Мир, М., 1980.
- [16] Шакирьянова И.Р. *et al.* Анализ сезонных вариаций потока мюонов космических лучей в детекторе LVD за период 2001-2008 г. // Proceedings of the 31<sup>th</sup> RCRC, Moscow, 2010.

