

## Температурный эффект мюонной компоненты и практические вопросы его учета

Berkova M., Belov A., Eroshenko E., Смирнов Д., Yanke V.

*Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN), Moscow, Russia*

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 чаще всего или вообще отсутствуют и ретроспективно восстановить их невозможно, или выполняются не регулярно. Предлагается использовать другой способ расчёта температурного эффекта, основанный на глобальных атмосферных моделях. Такие модели создаются с помощью обобщенных метеорологических данных и позволяют получить температурный ход в атмосфере в любом пункте и в любой момент времени. Используя вертикальные профили температуры на стандартных изобарических уровнях, взятые из такой метеорологической модели, мы исправили часовые данные для 17 направлений телескопа Nagoya, 3-х направлений телескопа Yakutsk, ионизационных камер в Якутске и Пекине за весь период таких наблюдений. Сравнение результатов, полученных по данным прямого зондирования высотного хода температуры и полученных по данным модели, позволяет утверждать, что предлагаемый подход можно успешно применять для исправления данных мюонных детекторов на температурный эффект.

### Введение.

При исследовании вариаций космических лучей (КЛ) в первую очередь необходимо освободиться от вариаций атмосферного происхождения. Если барометрический эффект определяется всего одним параметром, а именно давлением на уровне наблюдения, то температурный эффект определяется состоянием всей атмосферы от уровня генерации нестабильных компонент вторичного космического излучения до уровня их регистрации. Давление на уровне наблюдения с достаточной точностью непрерывно измеряется прецизионными датчиками давления, тогда как для определения температурного разреза атмосферы необходимо аэрологическое зондирование температурного профиля, которое в лучшем случае производится четыре раза в сутки. Сложность получения непрерывного часового ряда данных о метеорологических параметрах вблизи пункта расположения мюонного телескопа, даже скорее их отсутствие, уже в течение нескольких десятков лет не давало возможности в полной мере использовать богатейший полученный экспериментальный материал. Метод скрещенных телескопов для частного случая определения анизотропии КЛ позволил изящно решить проблему метеорологических эффектов мюонной компоненты, но в целом задача учета температурных эффектов на сегодняшний день не решена.

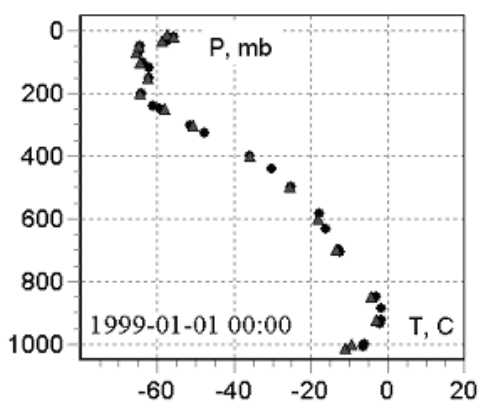
Относительная роль метеорологических эффектов космических лучей определяется типом вариаций и в некоторых случаях учет метеорологических эффектов особенно важен. Понятно, что наиболее трудно исследовать те вариации внеатмосферного происхождения (годовые, 27-дневные, солнечно-суточные), период которых совпадает или близок к периоду соответствующей вариации и сильно маскируются вариациями атмосферного происхождения. Действительно, амплитуда суточной волны температурного эффекта может достигать нескольких процентов для мюонной компоненты. Температурные поправки становятся еще более существенными при исследовании 27-дневных или годовых вариаций, которые, часто коррелируют с изменениями метеорологическими факторами. Наибольший вклад температурный эффект вносит в годовую вариацию, которая для мюонной компоненты превышает пять процентов, что уже просто сравнимо с амплитудами долгопериодных вариаций частиц

этих энергий. Использование метода скрещенных телескопов делает практически несущественной температурную вариацию при исследовании анизотропии КЛ.

С другой стороны, для нейтронной компоненты температурный эффект не играет сколько-нибудь заметной роли, поскольку амплитуда годовой волны почти на два порядка меньше, чем для мюонной компоненты, и составляет всего несколько сотых процента. Но при исследовании северо-южной анизотропии ситуация противоположная, поскольку привлекаются данные нейтронных мониторов расположенных в противоположных полушариях. Большие различия в **вариациях** температуры в северных и южных приполярных областях приводят к значительной температурной вариации. Такие температурные вариации сравнимы с северо-южной анизотропией, а иногда и превосходят ее. Особая опасность температурного эффекта в данном случае в том, что его планетарное распределение может быть очень похоже на распределение северо-южной асимметрии. Поэтому для такого класса задач температурный эффект необходимо учитывать и для нейтронных мониторов [1](Belov et al. 1995d; Белов et al., 1997).

#### Данные температурного зондирования.

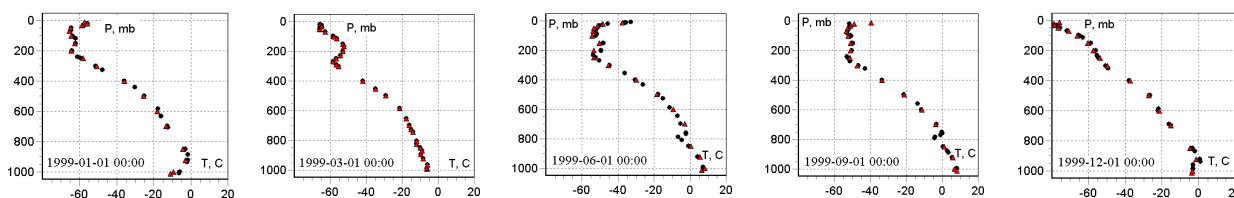
Для получения информации о высотном распределении температуры, кроме непосредственного зондирования атмосферы вблизи пункта расположения мюонного телескопа, возможен и другой подход. Если говорить о глобальных данных, то



**Рис. 1.** (потом выберем рис1 или 1а) Сравнение распределения температуры в атмосфере, полученное в соответствии с моделью (красные треугольники) и экспериментально (черные кружки) для Москвы.

радиозондирование, оптическое, акустическое и радиолокационное зондирование дает только 15 % информации о высотном ходе температуры, оставляя почти неохваченными обширные океанические, приполярные и горные районы; эффективно изучать эти районы удаётся только с помощью искусственных метеорологических спутников. На основе обобщенных данных в метеорологии строятся модели, которые позволяют получить температурный ход в атмосфере в любом пункте и в любой момент времени [2] (NOAA, 2007). Результаты одной из таких моделей доступны в электронной публикации [3] (NOAA, 2008). Такая модель позволяет получить трехмерное поле температуры и ее временные

вариации, начиная с 1949 года на 18 изобарических уровнях: sl, 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 mb.



**Рис. 1а.** Сравнение распределения температуры в атмосфере в различные сезоны, полученное в соответствии с моделью (красные треугольники) и экспериментально (черные кружки) для Москвы.

Данные таких моделей доступны не только для ретроспективного анализа, но в настоящее время поддерживаются и в реальном времени, что также позволяет в реальном времени исключать температурный эффект. Такого рода данные, мы и будем использовать в дальнейшем. Точность таких данных несколько 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 [4] Москва (Метео-27612, 2008). Сравнение указывает, что расхождение экспериментальных и модельных значений всего несколько градусов. В работе [1] (Belov 1995d; Белов, 1997) по данным этой же модели исследовался температурный эффект нейтронной компоненты космических лучей и анализ показал, что точность модельных данных о высотном распределении температуры в атмосфере достаточна даже для исследования на порядок более слабого температурного эффекта нейтронной компоненты космических лучей. Для интересующих нас пунктов (Нагоя, Якутск и Пекин) и временных интервалов по данным [2] (NOAA, 2007) мы получили данные высотного зондирования. Модель генерирует данные с 3-х часовой скважностью, которые в результате интерполирования кубическими сплайн - функциями [5] (Forsythe, 1977; Форсайт, 1980), были преобразованы в данные с часовой скважностью.

### Данные непрерывного мониторинга космических лучей.

Непрерывный мониторинг мюонной компоненты, по разным причинам, проводился только несколькими инструментами. Это, в первую очередь, наиболее удачный с точки зрения конструкции многонаправленный сцинтилляционный телескоп в Нагоя [6] (Nagashima, 1978), работающий с 1970 года. Число независимых направлений 17: вертикаль, по 4 наклонных 30°, 49° и 64° и 4 азимутальных направлений. Архивные данные телескопа доступны по адресу [7] (Nagoya, 1976), а данные в реальном времени – по адресу [8] (Nagoya, 2007). Другие два мюонных телескопа [9](), работающие более трех десятилетий, это наземный и подземный на уровне 7 м в.э. прибора в Якутске, которые имеют по 3 независимых направления: вертикаль, север и юг. В Якутске более 5-ти десятилетий ведутся наблюдения с помощью прецизионной ионизационной камеры ASK-1 [10,11](). Точно такая же камера работает в Пекине [12] (). Данные всех этих детекторов получены с часовым интервалом усреднения, исправлены на барометрический эффект, но не исправлены на температурный эффект.

### Температурный эффект мюонной компоненты.

На основе интегрального метода вариации, обусловленные температурным эффектом, для каждого направления детектора могут быть учтены следующим образом

$$\delta_{tem} = \int_0^{h_0} \alpha(h) \cdot \delta T(h) \cdot dh, \quad \text{где вариации}$$

температурного хода в атмосфере. Вариация температурного хода определяется как отклонение текущего от температурного хода в атмосфере в базовый период:  $\delta T(h) = T_B(h) - T(h)$ . Плотности температурных коэффициентов  $\alpha(h)$  различных детекторов получены расчетным путем и приведены на рис. 2 [13]. Кроме всех направлений телескопа Nagoya (0°, 30°, 39°, 49°, 64°), приведены также плотности температурных коэффициентов телескопов Якутского комплекса (0° уровень моря и 7 mwe) и ионизационной камеры IC. Для сравнения приведена также плотность температурного коэффициента нейтронного монитора.

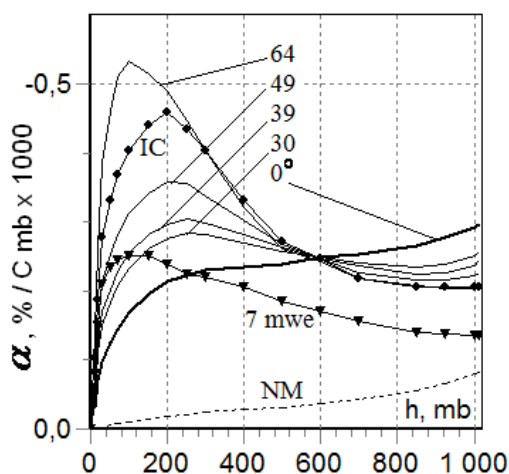


Рис. 2. Плотность температурного коэффициента для различных детекторов.

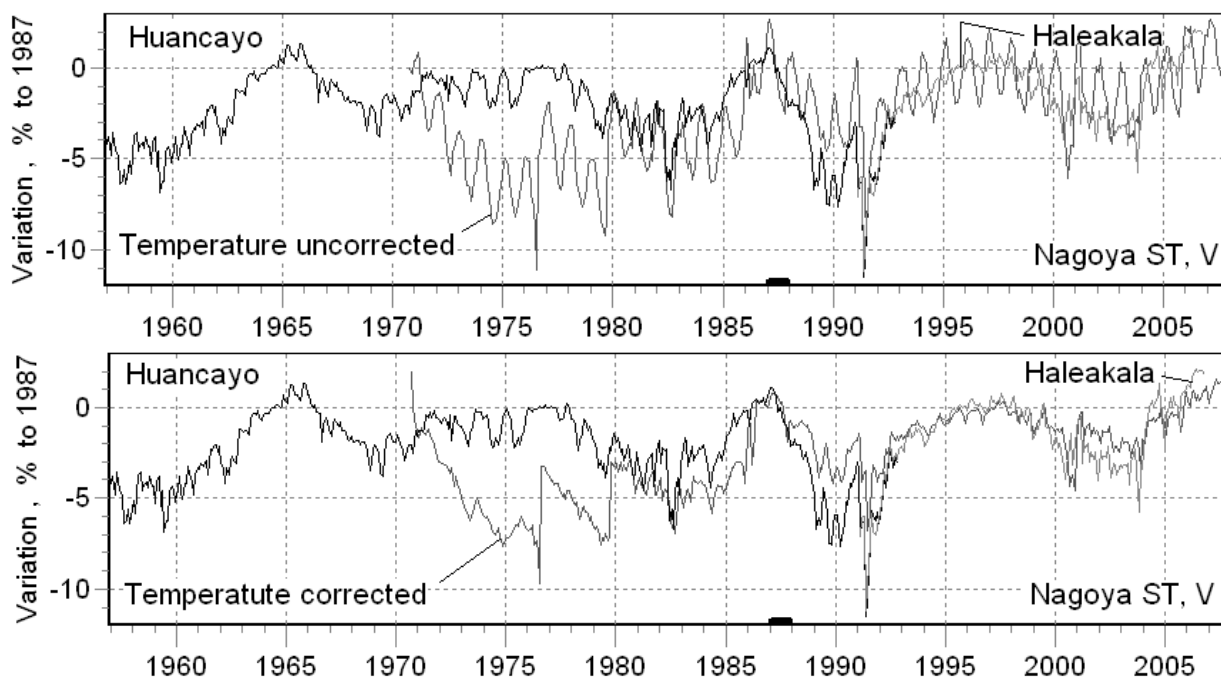
### Обсуждение результатов.

По изложенной выше методике нами были исправлены часовые данные с начала наблюдений для следующих детекторов:

- Многонаправленного мюонного телескопа Nagoya, 17 направлений регистрации;
- Наземного якутского мюонного телескопа, 3 направления V,N,S;
- Подземного якутского мюонного телескопа, 7 m.w.e, 3 направления V,N,S;
- Ионизационной камеры Якутск;
- Ионизационной камеры Пекин.

Часовые данные, исправленные на температурный эффект, доступны в сети Интернет [14].

На верхней панели рис. 3 приведены неисправленные и исправленные на температурный эффект скорости счета для вертикального направления регистрации

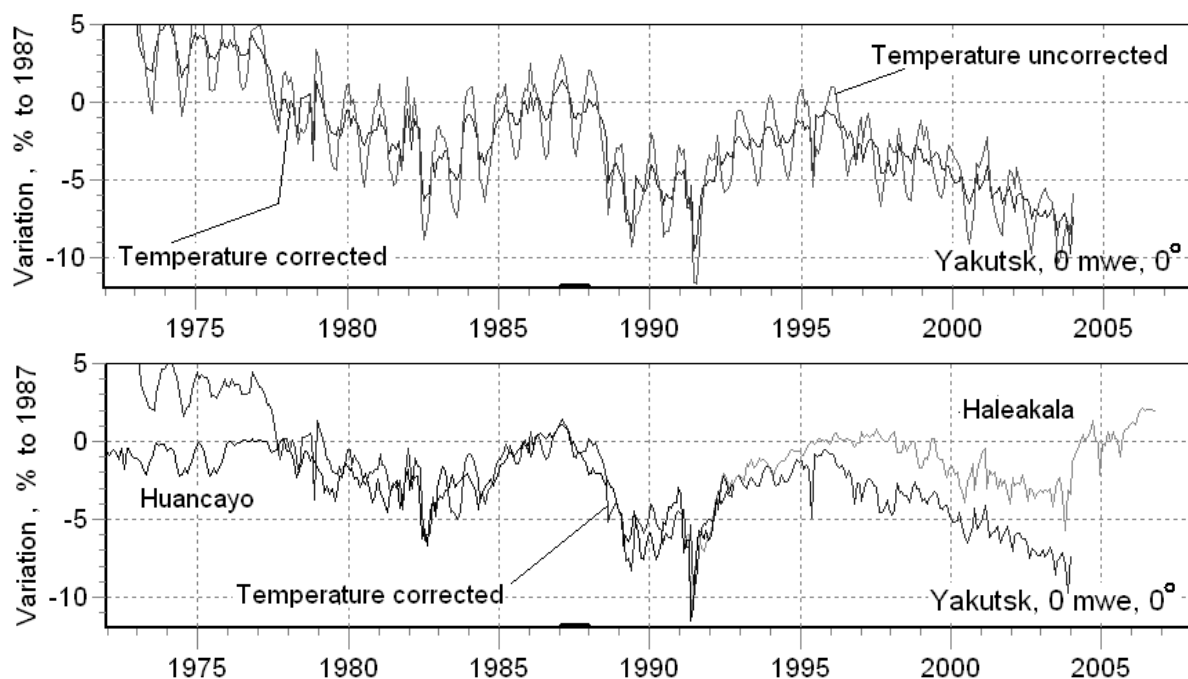


**Рис. 3.** Мюонный телескоп Nagoya, вертикаль. Верхняя панель – неисправленная и исправленная на температурный эффект скорость счета. Сравнение данными нейтронного монитора Huancayo и Haleakala.

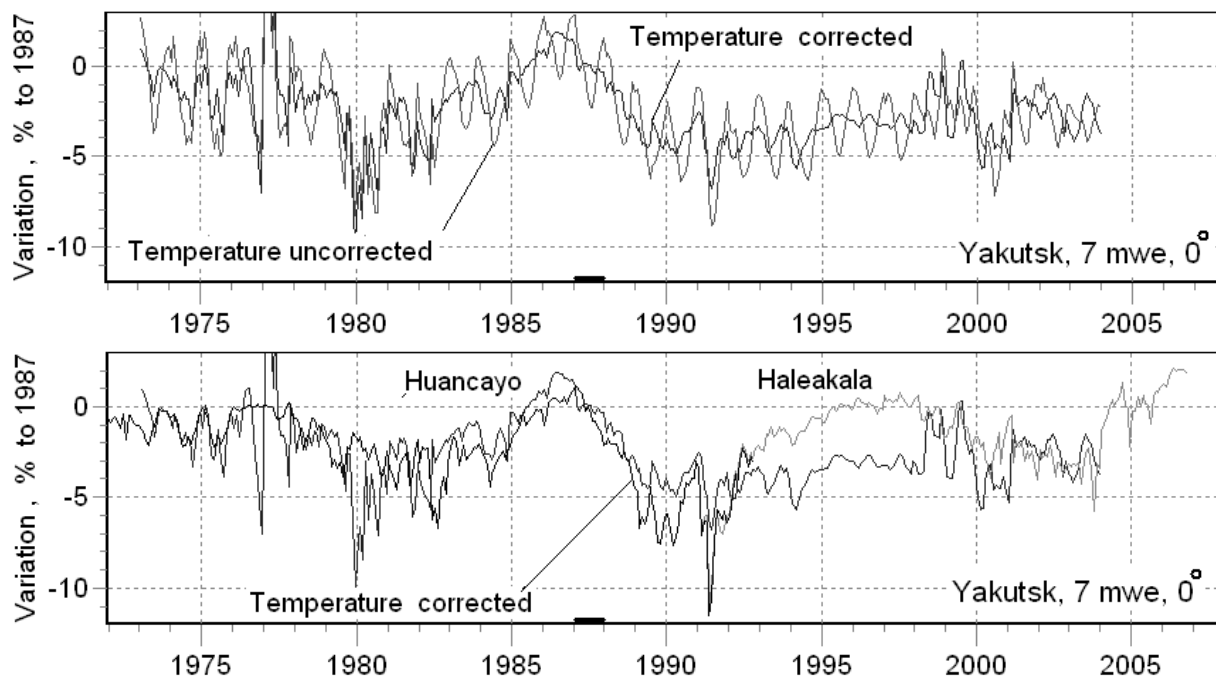
мюонного телескопа Nagoya. При введении поправок мы использовали рассчитанные плотности температурных коэффициентов, приведенные на рис. 2. Некоторая остаточная годовая волна может быть связана с истинными годовой вариацией и с неточность используемых плотностей температурных коэффициентов. Очевидно, что для дальнейшего уточнения результата необходимо экспериментально определить плотности температурного коэффициента, что сегодня является вполне решаемой задачей. На нижней панели рис. 3 исправленные данные сравниваются с данными экваториальных нейтронных мониторов станций Huancayo и Haleakala. Хотя жесткости геомагнитного обрезания достаточно близки (13.3 GV для монитора Haleakala и 11.5 GV для вертикального мюонного телескопа) медианная жесткость нейтронных мониторов **30.6 GV** меньше по сравнению с мюонным телескопом **53.5 GV**, что приводит к разной глубине модуляции в максимумах солнечной активности. В целом можно заметить, что, начиная с середины 80-х годов, мюонный телескоп работает достаточно стабильно, и вариации согласуются даже в деталях. Кроме того, можно сделать вывод, что используемые нами вертикальные профили распределения температуры атмосфере и плотности температурных коэффициентов позволяют качественно исключать температурный эффект из данных наблюдений. Введением поправок на эффективность, дрейф может быть устранен на начальном отладочном этапе.

Для вертикальных направлений наземного и подземного 7 м в.э. мюонных телескопов первичные и исправленные данные приводятся на рис. 4 и 5, которые также

сравниваются с данными экваториальных нейтронных мониторов. И в этом случае медианная жесткость мюонной компоненты для наземного и подземного телескопа соответственно выше, чем в случае нейтронных мониторов. В случае телескопов Якутского комплекса можно утверждать, что используемая нами методика дает вполне удовлетворительные результаты. Дрейф скорости счета вертикального телескопа на уровне моря после 1995 года, возможно, имеет те же причины, что и дрейф тока ионизационной камеры Якутск, которая рассматривается ниже.

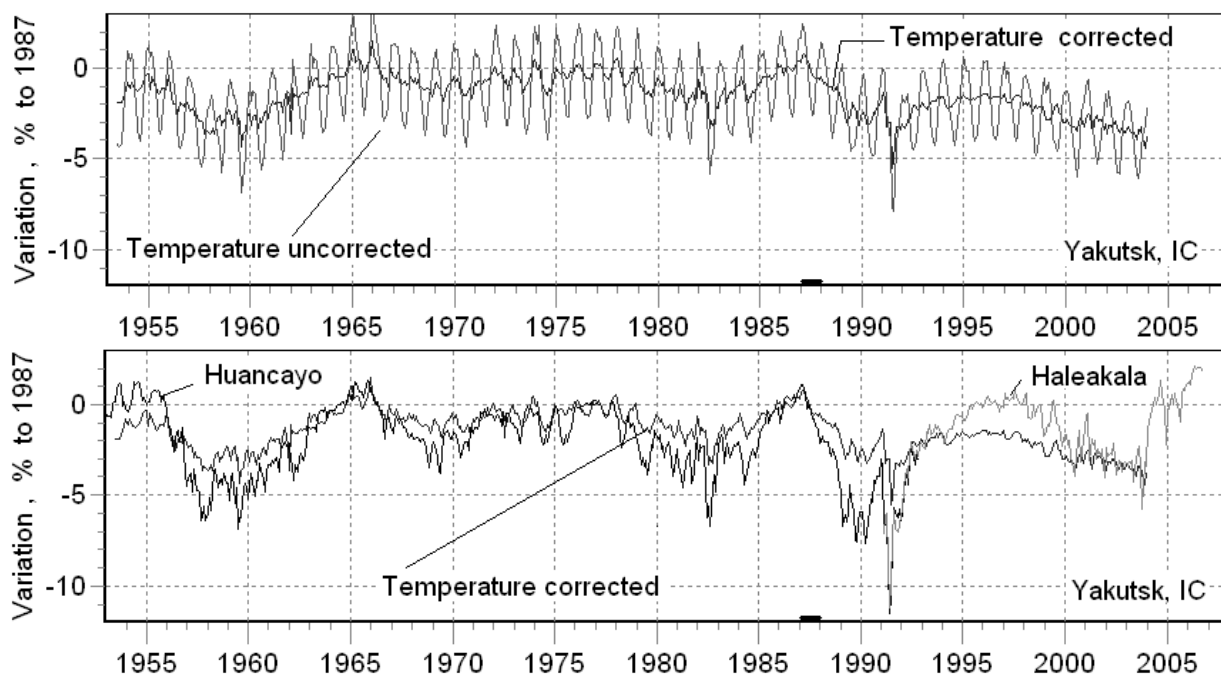


**Рис. 4.** Якутский мюонный телескоп, 0 mwe, вертикаль. Верхняя панель – неисправленная и исправленная на температурный эффект скорость счета. Сравнение с данными нейтронного монитора Huancayo и Haleakala.



телескоп, 7 мве. Верхняя панель – неисправленная и исправленная на температурный эффект скорость счета. Сравнение с данными нейтронного монитора Huancayo и Haleakala.

Неисправленный и исправленный на температурный эффект ток ионизационной камеры Якутск приведен на верхней панели рис. 6. При введении поправок мы



температурный эффект скорость счета. Сравнение с данными нейтронного монитора Huancayo и Haleakala.

первоначально использовали рассчитанные плотности температурных коэффициентов, приведенные на рис. 2, т.е. те же, что и для наклонного  $60^\circ$  телескопа на уровне моря. Введение, таким образом, температурных поправок переснимает сезонную вариацию. Для устранения этого факта необходимо плотность температурного коэффициента уменьшить примерно на  $30 \pm 2\%$ , т.е. коэффициент очень критичен.

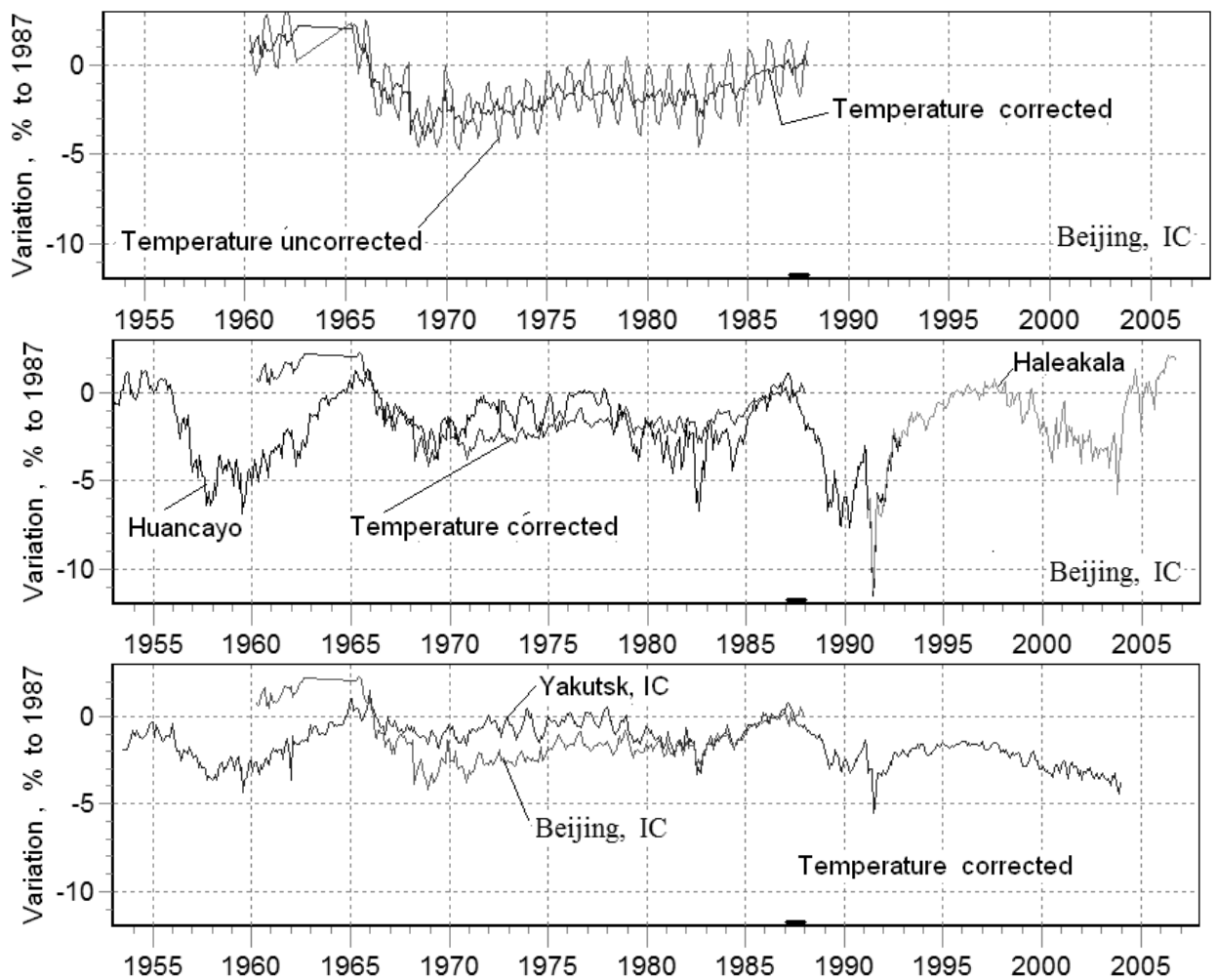


Рис. 7. Ионизационная камера Пекин. Верхняя панель – неисправленная и исправленная на температурный эффект скорость счета. Средняя панель - сравнение с данными нейтронного монитора Huancaayo и Haleakala. Нижняя панель – сравнение IC Якутск и Пекин.

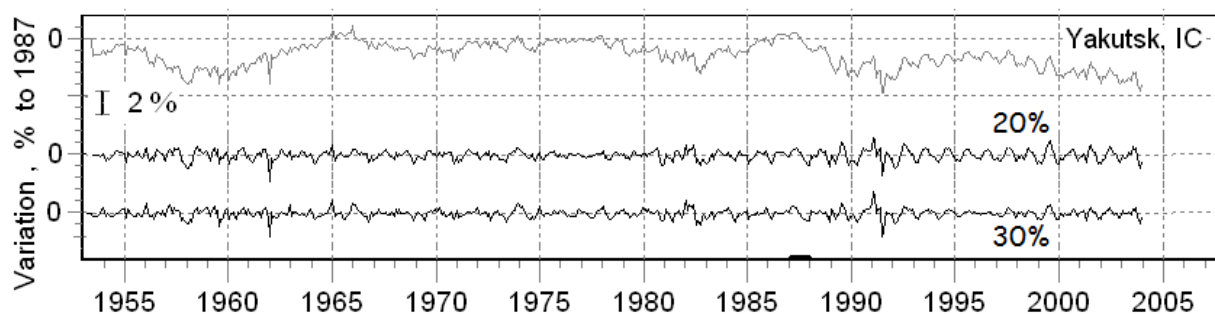
Необходимость корректировки плотности температурного коэффициента отмечалась и в более ранних работах [15] (Чирков et al., 1971) и предполагалось, что для Якутской ионизационной камеры это связано со значительной толщиной экрана над ионизационной камерой (около 1 м в.э.).

На нижней панели рис. 6 исправленные данные сравниваются с данными экваториальных нейтронных мониторов станций Huancaayo и Haleakala. Медианная жесткость нейтронного монитора Haleakala 30.6 GV ближе к медианной жесткости ионизационной камеры  $my66.1$  GV. В целом можно заметить, что ионизационная камера работает достаточно стабильно. Дрейф тока после 1995 года, возможно, связан с дрейфом данных датчика давления, и имеет те же причины, что и дрейф скорости счета вертикального телескопа на уровне моря.

Данные ионизационной камеры Пекин приведены на рис. 7. Хотя ионизационная камера Пекин находится под экраном толщиной всего 0.1 м в.э., плотность температурного коэффициента использовалась та же, что и для ионизационной камеры Якутск. Сравнивая на средней панели с данными нейтронных мониторов станций Huancaayo и Haleakala можно отметить стабильную работу ионизационной камеры Пекин, но в 70-е годы ее показания, видимо, несколько занижены. На нижней панели рис. 7 одновременно приведены вариации данных двух ионизационных камер Якутск и Пекин.



Теперь нужно оценить насколько точно были выполнены поправки на температурный эффект. Для этого необходимо данные детектора освободить от первичных вариаций и анализировать оставшийся сигнал, который в идеале должен представлять собой белый шум. Корректное исправление данных детектора на первичные вариации задача сложная, и ее можно решить с различной степенью приближения. Избежать такой сложной процедуры, можно, если сигнал обработать соответствующим фильтром. На рис. 8 приведен остаточный сигнал после вычитания среднегодовых значений. Приведены два варианта, когда расчетные плотности температурных



**Рис. 8.** Остаточный сигнал после обработки фильтром данных IC Якутск. Приведены два варианта, когда расчетные плотности температурных коэффициентов уменьшены на 20% и 30%.

коэффициентов уменьшены на 30% и на 20%. Видно, что годовая волна снимается в одни периоды и возникает в другие периоды. Это свидетельствует о том, что плотность, хотя и слабо, зависит от уровня солнечной активности.

### Выводы.

- 1) Вертикальные профили распределения температуры в атмосфере, найденные по данным модели атмосферы, позволяют качественно исключать температурный эффект из часовых данных наблюдений мюонных телескопов и ионизационных камер.
- 2) Сравнение данных мюонной компоненты, исправленных на температурный эффект, с данными других детекторов экспериментально в целом подтвердило правильность, используемых плотностей температурных коэффициентов для всех направлений, хотя экспериментальное определение плотностей температурных коэффициентов в дальнейшем была бы очень полезной.

### Acknowledgements

This work is partly supported by Russian FBR grants 07-02-00915, 06-02-39028-гфен\_а, 07-02-13525-офи\_ц and grants N 213007 NMDB, Program No 6 BR of the Presidium RAS “Neutrino Physics” and Acknowledgements to <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/main.htm>.

### Литература

- [1] 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. Температурный эффект нейтронной компоненты космических лучей. Геомагнетизм и аэрономия, т.37. N2.с.100, 1997.
- [2] NOAA, <http://esse.wdcb.ru>, 2007. – делать ссылку на погодный сервер.
- [3] NOAA, <http://spidrd.ngdc.noaa.gov/class> or <http://phoenix.wdcb.ru/class> (требуется установка Java) or <http://ideas.ngdc.noaa.gov/ideas>, 2008.
- [4] Meteo-27612, [http://meteo.infospace.ru/win/wcarch/html/r\\_day\\_stn.sht?stn=1692](http://meteo.infospace.ru/win/wcarch/html/r_day_stn.sht?stn=1692)



- [5] Forsythe G., Malcolm M., Moler C., Computer methods for mathematical computations, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1977; Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К., “Машинные методы математических вычислений”, Изд-во Мир, М., 1980.
- [6] Nagashima K., Fuji Z., Sakakibara S., Fujimoto K., Ueno H. Report of cosmic ray research laboratory, N3, Nagoya, 1978.
- [7] Nagoya, Archive, 1976, <http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp/stelab/www1/div3/muon/muon3.html>
- [8] Nagoya, Real Time, 2007,
- [9] Архив данных, Якутский мюонный телескоп, <http://ysn.ru/ipm/muon/>, 2008
- [10] Shafer G.V., Yu.G. Shafer. “Precision observation of cosmic rays in Yakutsk”. Novosibirsk: Nauka. 1984. 732p. (In Russian); Шафер Г.В., Шафер Ю.Г., “Прецизионные измерения космических лучей в Якутске”, Новосибирск, Наука, Сибирское отделение, 1984.
- [11] Архив данных, Якутская ионизационная камера, <http://ysn.ru/ipm/ASK-1/>, 2008
- [12] Xue Shunsheng, "Cosmic Ray Intensity Hourly Meson Intensity During 1960-1986" Beijing, China, 1988
- [13] Dorman L.I. and Yanke V.G., "To the theory of cosmic ray meteorological effects, I". Izvestia Academy of Sciences USSR, Series Phys., Vol. 35, No. 12, pp. 2556-2570, 1971; Дорман Л.И., Янке В.Г., “К теории метеорологических эффектов космических лучей”, Изв.Ан СССР, серия физическая, т. 35, No 12, 2556, 1971.
- [14] Исправленные на температурный эффект часовые данные телескопов [ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY!/FTP\\_MUON/](ftp://cr0.izmiran.rssi.ru/COSRAY!/FTP_MUON/), 2008.
- [15] Чирков Н.П., Кузьмин А.И., Шафер Г.В., ”Годовые вариации и градиент интенсивности космических лучей в меридиональной плоскости”, Геомагнетизм и аэрономия, т.11, N1.с.149-151, 1971.