

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ  
ДЛЯ МЮОНОВ В АТМОСФЕРЕ****DETERMINATION OF DENSITY OF TEMPERATURE COEFFICIENTS  
FOR THE EARTH'S ATMOSPHERE MUONS****В.С. Кузьменко***Геофизическая служба СО РАН,  
Новосибирск, Россия, mp3.87@mail.ru***В.Л. Янчуковский***Геофизическая служба СО РАН,  
Новосибирск, Россия, vjanch@gs.sbras.ru***V.S. Kuzmenko***Geophysical Survey SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, mp3.87@mail.ru***V.L. Yanchukovsky***Geophysical Survey SB RAS,  
Novosibirsk, Russia, vjanch@gs.sbras.ru*

**Аннотация.** При исследовании вариаций интенсивности космических лучей с помощью мюонных телескопов, расположенных в глубине атмосферы, необходим учет изменений параметров атмосферы, в основном давления и температуры. Для оценки распределения плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере по данным наблюдений рассмотрены метод регрессии на главные компоненты (РГК) и методы проекций на латентные структуры ПЛС-1 и ПЛС-2. Были использованы данные непрерывной регистрации мюонов и аэрологические данные, полученные в Новосибирске в 2004–2010 гг. Сопоставление результатов показало, что метод ПЛС-2 позволяет с минимальными ошибками оценить распределение плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере.

**Ключевые слова:** космические лучи, мюоны, атмосфера, температура.

**Abstract.** When studying variations of cosmic ray intensity, by the use of muon telescopes located deep in the atmosphere it is necessary to take into account changes in atmospheric parameters, mainly pressure and temperature. The density distribution of temperature coefficients of the atmosphere muon intensity needs to be estimated from observations. To this purpose, the method of principal components regression and methods of projection to latent structures (PLS-1 and PLS-2). We used data of continuous recording of muons, as well as Novosibirsk 2004–2010 aerological data. As shown by comparing results, PLS-2 method allows us to estimate the density distribution of muon intensity temperature coefficients with minimal errors.

**Keywords:** cosmic rays, muons, atmosphere, temperature.

**ВВЕДЕНИЕ**

Мюонные телескопы для исследования вариаций космических лучей (КЛ) появились значительно раньше нейтронных мониторов [Дорман, 1975]. Однако впоследствии нейтронные мониторы, вытеснив существующие мюонные телескопы, стали основными приборами мировой сети станций КЛ. Одной из причин были трудно учитываемые атмосферные эффекты мюонных телескопов. Для нейтронного монитора они сводились к легко учитываемому барометрическому эффекту, поскольку температурный эффект практически отсутствовал. В последние годы интерес к мюонным телескопам значительно возрос. Это объясняется рядом отличительных особенностей мюонной компоненты:

- высокая статистическая точность регистрации (по сравнению с нейтронной компонентой);
- возможность создания на станциях КЛ многоканальных комплексов, обеспечивающих регистрацию различных компонент вторичных КЛ;
- слабая зависимость интенсивности от угла к зениту по сравнению с нейтронной компонентой, что позволяет реализовать широкий набор направ-

лений регистрации мюонов вплоть до зенитного угла  $90^\circ$ .

Кратко можно очертить круг основных задач, решение которых базируется также на данных мюонных телескопов:

- оценка параметров энергетического спектра модуляции потока КЛ в межпланетном пространстве;
- определение анизотропии и градиентов КЛ с энергией 1–200 ГэВ с целью разработки методов диагностики межпланетной среды по данным наземных наблюдений КЛ;
- анализ атмосферных процессов по данным глобальной интенсивности общей ионизирующей компоненты (электричество атмосферы, КЛ, температурный режим атмосферы и др.).

Мюонные телескопы на газоразрядных счетчиках Гейгера–Мюллера были созданы в период МГГ [Блох, 1961; Иноземцева, Капитонов, 1961]. К сожалению, уже на начальном этапе исследований выяснилось, что статистическая точность приборов недостаточна для решения поставленных задач [Шепли, 1969]. В скором времени они были вытеснены телескопами на пластических сцинтилляторах и больших пропорциональных счетчиках, включающими:

- сцинтилляционный телескоп ИЗМИРАН [Либин и др., 1975];
- сцинтилляционный телескоп в Нагойе [Nagashima, 1978];
- сцинтилляционный телескоп ТЕМП-МИФИ [Borog, 2001];
- сцинтилляционный телескоп бразильско-японского проекта в Sao Martinho [Munakato, 2001];
- Якутский подземный комплекс [Григорьев и др., 2007];
- Новосибирский многоканальный наблюдательный комплекс [Янчуковский, 2010].

Однако проблема учета температурного эффекта мюонов в атмосфере осталась не до конца решенной. Температурный эффект мюонов обусловлен изменениями температуры всех слоев атмосферы. Интегральный метод учета эффекта [Дорман, 1972] предусматривает знание распределения плотности температурного коэффициента для мюонов в атмосфере непосредственно для каждой экспериментальной установки. При теоретических расчетах температурных коэффициентов [Дорман, 1972; Беркова и др., 2009; Дмитриева и др., 2009] используются различные приближения, и поэтому результаты сложно применять при введении поправок на вариации температуры атмосферы. Ранее [Тясто, 1961; Dubinsky, Chaloupka, 1962] делались попытки оценки температурных коэффициентов для мюонов с использованием методов многофакторной регрессии. К сожалению, применение этих методов в подобных задачах некорректно. Этим объясняется низкая точность полученных результатов. Экспериментально оценить распределение плотности температурных коэффициентов также сложно, поскольку вариации температуры различных слоев атмосферы коррелированы. В связи с этим были использованы методы факторного анализа [Pearson, 1901; Sylvester, 1889]. Для исследования температурного эффекта интенсивности мюонов в атмосфере рассмотрены три метода: регрессия на главные компоненты (РГК) [Jolliffe, 2002; Gorban et al., 2007], методы проекций на латентные структуры (ПЛС-1 и ПЛС-2) [Эсбенсен, 2005; Померанцев, 2014].

## МЕТОДЫ

Метод главных компонент (ГК) [Айвазян, 1989] представлен схемой на рис. 1.

Здесь  $X$  — матрица независимых переменных;  $T$  — матрица счетов;  $P$  — матрица нагрузок;  $E$  — матрица погрешностей;  $p$  — переменные;  $n$  — число объектов;  $a$  — число ГК;  $a \leq \min(n, p)$ . Графики счетов интерпретируются как графики объектов, а графики нагрузок — как графики переменных в пространстве ГК. Счета  $T$  и нагрузки  $P$  являются ортогональными, что позволяет избавиться от коллинеарности в данных и осуществить прямое разрешение регрессии. Расчет факторов в пространстве ГК удобно производить с помощью SVD-декомпозиции. С использованием зависимой переменной  $Y$  производится регрессия на счета  $T$ :

$$Y = \sum_{a=1}^A w_a T_a = TW. \quad (1)$$

Затем полученные коэффициенты в пространстве ГК

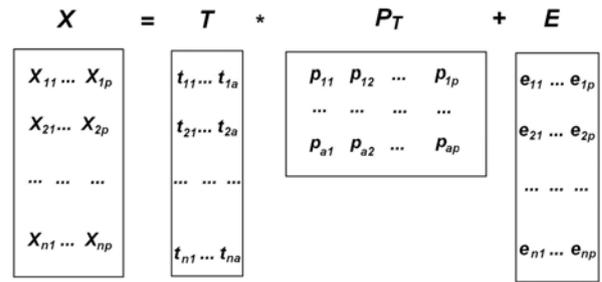


Рис. 1. Метод главных компонент

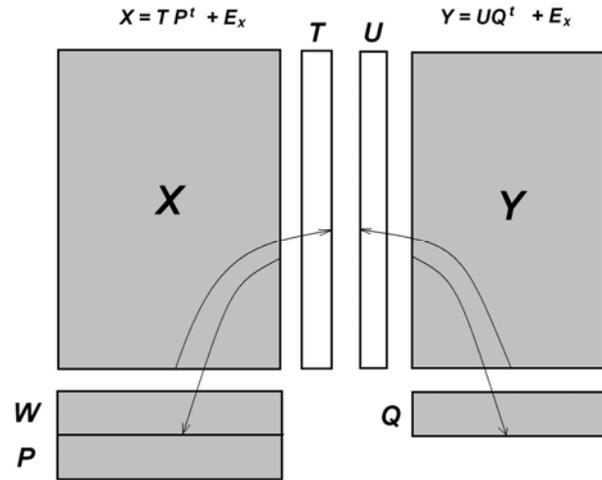


Рис. 2. Метод проекций на латентные структуры

с помощью матрицы нагрузок  $P$  переводятся в исходное пространство

$$B = PW. \quad (2)$$

Матрица коэффициентов  $B$  в исходном пространстве представляет искомую модель. По ней осуществляется расчет  $Y = X_{\text{new}} B$ .

Метод проекций на латентные структуры показан на рис. 2.

Здесь  $X$  — матрица независимых переменных;  $Y$  — матрица зависимых переменных;  $T, U$  — матрицы счетов;  $P, Q$  — матрицы нагрузок;  $E$  — матрица погрешностей. ПЛС-пространство создается при участии двух переменных  $X$  и  $Y$  одновременно. Критерий — моделирование той структуры (информации) в  $X$ , которая коррелирует с  $Y$ . Существуют две разновидности ПЛС: ПЛС-1 и ПЛС-2. В ПЛС-1 модель строится для единственной зависимой переменной  $y$  из  $Y$ , а в ПЛС-2 рассчитывается для всей матрицы  $Y$ .

Итерационный алгоритм расчета факторов в пространстве ГК для ПЛС-1:

1. Расчет нормализованного вектора взвешенных нагрузок  $\vec{w}$ :

$$\vec{w}_f = X_f^t \vec{y}_f / |X_f^t \vec{y}_f|.$$

2. Расчет вектора весов  $\vec{t}$ :

$$\vec{t}_f = X_f^t \vec{w}_f.$$

3. Расчет нагрузки  $q$  (скаляр) фактора  $f$ :

$$q_f = \vec{y}_f^t \vec{t}_f / \vec{t}_f^t \vec{t}_f.$$

4. Расчет вектора весов  $\vec{p}$ :

$$\vec{p}_f = X_f^t \vec{t}_f / \vec{t}_f^t \vec{t}_f.$$

5. Расчет остатка  $X$  и  $y$ :

$$X_{f+1} = X_f - \vec{t}_f^t \vec{p}_f, \quad \vec{y}_{f+1} = \vec{y}_f - \vec{t}_f^t \vec{q}_f.$$

6. Переход к следующему фактору:  $f+1$ .

Итерационный алгоритм расчета факторов в пространстве ГК для ПЛС-2:

1. Выбор начального приближения  $\vec{u}$ :  $\vec{u}_f$ .

2. Расчет нормализованного вектора взвешенных нагрузок  $\vec{w}$ :

$$\vec{w}_f = X_f^t \vec{u}_f / \left| X_f^t \vec{u}_f \right|.$$

3. Расчет вектора весов  $\vec{t}$ :

$$\vec{t}_f = X_f^t \vec{w}_f.$$

4. Расчет нормализованного вектора нагрузок  $\vec{q}$ :

$$\vec{q}_f = Y_f^t \vec{t}_f / \left| Y_f^t \vec{t}_f \right|.$$

5. Расчет нового вектора счетов  $\vec{u}$ :

$$\vec{u}_f = Y_f^t \vec{q}_f / \left| Y_f^t \vec{q}_f \right|.$$

6. Проверка сходимости: нет  $\rightarrow$  замена  $\vec{u}_f$  на  $\vec{u}_{fH}$  переход на 2:

$$\left| \vec{t}_f - \vec{t}_{fH} \right| \leq \min.$$

7. Расчет вектора весов  $\vec{p}$ :

$$\vec{p}_f = X_f^t \vec{t}_f / \vec{t}_f^t \vec{t}_f.$$

8. Расчет коэффициента регрессии  $b$ :

$$b_f = \vec{u}_f^t \vec{t}_f / \vec{t}_f^t \vec{t}_f.$$

9. Расчет остатка  $X$  и  $Y$ :

$$X_{f+1} = X_f - \vec{t}_f^t \vec{p}_f, \quad Y_{f+1} = Y_f - \vec{t}_f^t \vec{q}_f.$$

10. Переход к следующему фактору:  $f=f+1$ .

Моделью является матрица коэффициентов  $B = W(P^t W)^{-1} Q^t$ . Прогнозируемые значения находятся как  $Y = X_{\text{new}} B$ . Качество моделирования каждым из рассмотренных методов зависит от конкретной задачи.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

Созданные программы предназначены для чтения и формирования требуемого формата следующих данных:

- данные аэрологического зондирования (Бугринская роща, Новосибирск): температура, скорость и направление ветра на различных изобарических уровнях (1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 50 мбар);
- данные наземных измерений интенсивности КЛ: нейтронной компоненты, общей ионизирующей компо-

ненты и мюонной компоненты под различными углами к зениту (0, 30, 40, 50, 60, 67, 71°) и с разными азимутами (юго-восток, северо-запад, юго-запад, северо-восток), а также атмосферного давления и температуры приземного слоя (станция КЛ, Новосибирск).

Дискретизация данных (2004–2010 гг.) обусловлена периодичностью аэрологического зондирования и составляет 12 ч. Обработка исходных данных, в первую очередь, предусматривает выделение температурной вариации интенсивности регистрируемых мюонов. Проводится спектрографический анализ данных многоканального комплекса КЛ [Yanchukovsky, 2011]. Метод основан на использовании данных многоканальных синхронных наблюдений нуклонной компоненты в различных энергетических интервалах и мюонной компоненты под различными углами к зениту в одном пункте (с помощью одной установки). Вариации интенсивности, регистрируемой каналом  $k$  установки в пункте с жесткостью геомагнитного обрезания  $R_c$  на уровне  $h_0$  атмосферы, связаны с первичным спектром КЛ  $D(R)$ , температурой  $T$  атмосферы и атмосферным давлением  $h$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta I_k}{I_{k,c}}(h_0, t) = & \int_{R_c}^{\infty} \frac{\Delta D}{D}(R, t) W_k(R, h_0) dR - \Delta R_c(t) W_k(\bar{R}_c, h_0) + \\ & + \left\{ \exp \left[ - \int_{h_0}^h \beta_k(h) dh \right] - 1 \right\} + \\ & + \int_0^h w_k(T_0, h_0, h) \Delta T(h, t) dh, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $W_k(R, h_0)$  — функция энергетической чувствительности канала  $k$ , или коэффициент связи согласно определению [Дорман, 1975];  $\beta_k(h)$  — барометрический коэффициент канала  $k$ ;  $w(T_0, h_0, h)$  — функция плотности температурных коэффициентов, отражающая вклад слоев атмосферы в создании интегрального температурного эффекта интенсивности;  $\Delta T(h)$  — временные вариации температуры атмосферы в зависимости от высоты. Система интегральных уравнений (3) в [Yanchukovsky, 2011] была преобразована в систему линейных уравнений, решение которой позволило разделить наблюдаемые вариации на составляющие различной природы: первичную, магнитосферную и атмосферную. Атмосферная составляющая обусловлена изменениями плотности и температуры атмосферы. Изменения плотности атмосферы во времени (барометрический эффект) легко учитываются путем введения соответствующих поправок [Дорман, 1972].

Возможности программы:

- учет в данных измерений интенсивности мюонов вариаций спектра первичных КЛ, изменений атмосферного давления и температуры приземного слоя;
- выбор интервала обучения и прогноза по датам;
- выбор изобарических уровней атмосферы и каналов телескопа;

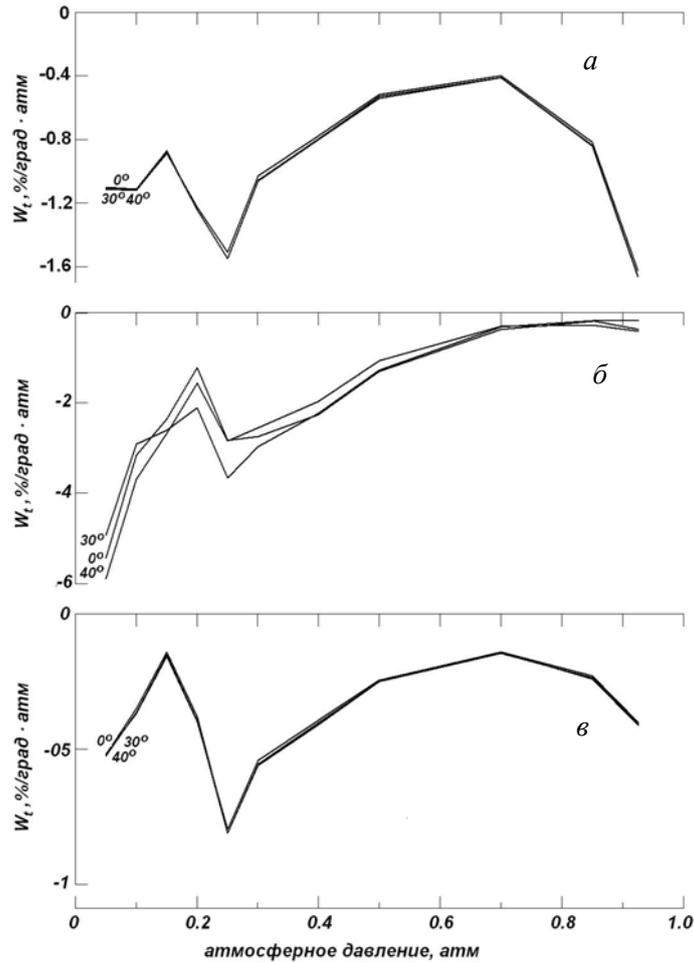


Рис. 3. Распределения плотности температурных коэффициентов интенсивности мюонов в атмосфере, полученные методами регрессии на главные компоненты (а), методами проекций на латентные структуры ПЛС-1 (б) и ПЛС-2 (в)

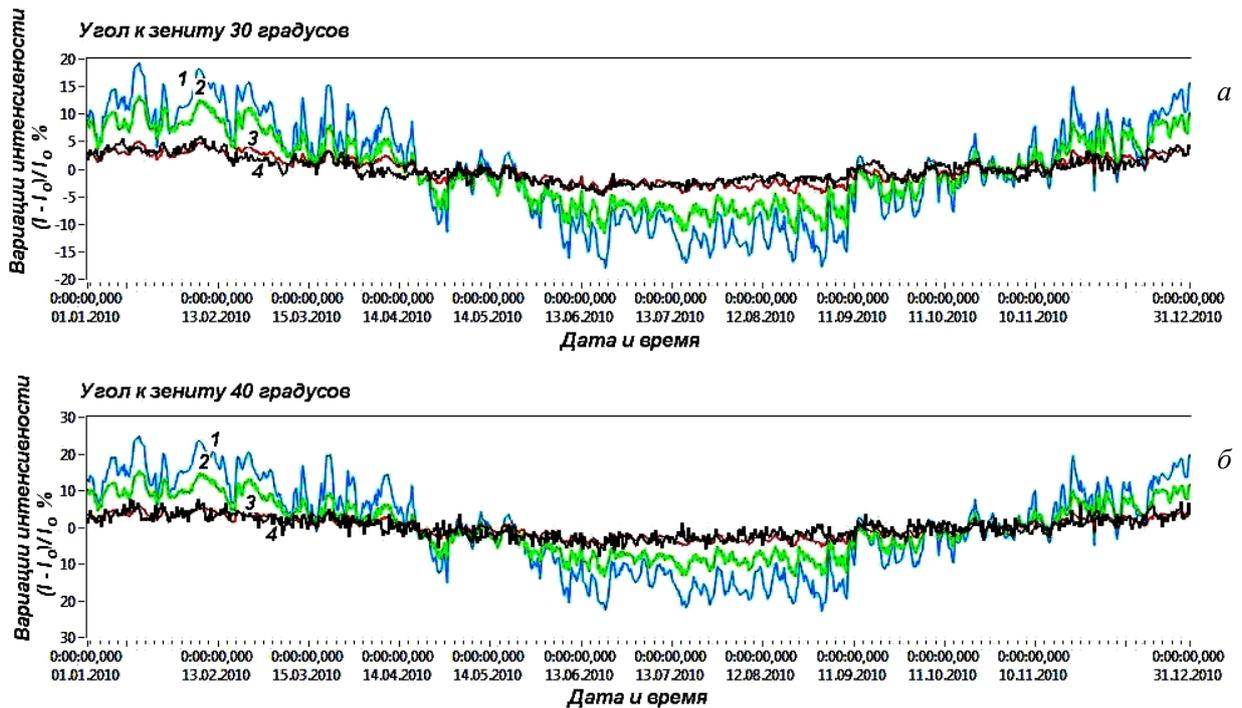


Рис. 4. Температурные вариации интенсивности мюонов в атмосфере под углами к зениту 30° (а) и 40° (б), рассчитанные с использованием методов РГК (кривая 2), ПЛС-1 (кривая 1), ПЛС-2 (кривая 3), и измеренные мюонными телескопами с этих направлений (кривая 4). Цветной рисунок доступен в электронной версии статьи

- включение годографа ветра в модель;
- анализ матриц счетов и нагрузок ( $T, U, P, W$ );
- сопоставление методов и аппроксимация рядов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

С применением приведенных трех методов рассчитаны распределения плотности температурного коэффициента интенсивности мюонов в атмосфере, которые показаны на рис. 3.

При рассмотрении матриц счетов и нагрузок установлено, что оптимально использовать в анализе 13 каналов регистрации мюонного телескопа. Оптимальное для модели количество главных компонент — 2. Период обучения — 2004–2009 гг.

Для сравнительной оценки качества модели проведено сопоставление рассчитанных (ожидаемых) вариаций интенсивности мюонов с измеренными вариациями за 2010 г. Ожидаемые (рассчитанные) температурные вариации интенсивности мюонов определялись с привлечением данных высотного профиля температуры атмосферы над Новосибирском за 2010 г. и распределений плотности температурных коэффициентов. Распределения получены тремя различными методами (см. рис. 3). Полученные результаты показаны на рис. 4.

Наилучшие результаты показал метод ПЛС-2. Максимальная разность значений амплитуд вариаций интенсивностей, вычисленной и измеренной в течение всего года, не превышает 2.3 %.

## ВЫВОДЫ

Проведена сравнительная оценка различных методов определения плотности температурных коэффициентов для мюонных телескопов КЛ по данным непрерывных наблюдений. Сделан выбор в пользу метода ПЛС-2, который позволяет по экспериментальным данным проводить оценку температурных коэффициентов для мюонных телескопов КЛ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 607 с.
- Блох Я.Л. Стандартный кубический телескоп // Космические лучи. М.: Наука, 1961. № 3. С. 80–104.
- Григорьев В.Г., Кривошапкин П.А., Крымский Г.Ф. и др. Приемные векторы комплекса мюонных телескопов станции Якутск // Всероссийская конференция «Современные проблемы космической физики»: Сб. докл. Якутск: Из-во Якутского научного центра СО РАН, 2007. С. 99–102.
- Дорман Л.И. Метеорологические эффекты космических лучей. М.: Наука, 1972. 211 с.
- Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 462 с.
- Дмитриева А.Н., Кокоулин Р.П., Петрухин А.А., Тимашов Д.А. Температурные коэффициенты для мюонов под различными зенитными углами // Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73, № 3. С. 371–374.
- Иноземцева О.И., Капитонов Ю.А. Азимутальный телескоп для исследования вариаций космических лучей в зависимости от направления прихода первичного излучения // Космические лучи. М.: Наука, 1961. № 3. С. 105–121.

Либин И.Я., Бакатов В.Н., Блох Я.Л. и др. Сцинтилляционный телескоп // Космические лучи. М.: Наука, 1975. № 15. С. 137–140.

Померанцев А.Л. Хемометрика в Excel: Учебное пособие. Томск: Из-во ТПУ, 2014. 435 с.

Тясто М.И. Эмпирическое определение температурного эффекта жесткой компоненты космических лучей на о. Хейса // Космические лучи. М.: Наука, 1961. № 3. С. 170–173.

Шепли А.Х. Руководство по международному обмену данных в солнечно-земной физике // 1-я рабочая группа Международной комиссии по солнечно-земной физике. Будапешт, 1969. 5 с.

Эбенсен К. Анализ многомерных данных. Избранные главы / Пер. с англ. С.В. Кучеряевского; Под ред. О.Е. Родионовой. Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. 160 с.

Янчуковский В.Л. Многоканальный наблюдательный комплекс космических лучей // Солнечно-земная физика. 2010. Вып. 16. С. 107–109.

Berkova M.D., Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Temperature effect of the muon component and practical issues of its account in real time // Proc. 21-st ECRS / Eds. P. Kiraly, K. Kudela, M. Steglik, A.W. Wolfendale. 2009. P. 123–126.

Borog V., Burinskiy A., Gvozdev A., et al. Large aperture muon hodoscope for studies in solar-terrestrial physics // Proc. 24<sup>th</sup> ICRC. Rome. 1995. V. 4. P. 1291–1295.

Dubinsky J., Chaloupka P. Meteorologické korekcie pre neutronový monitor a kucku teleskop na Lomnickom štíte. Sborn. ved. prace vysokey školy technickej v Kosiciach. 1962, Zy. 1, pp. 87–98 (in Czech).

Gorban A.N., Kegl B., Wunsch D., Zinovyev A.Y. Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction. Lecture Notes in Computational Science and Engineering. Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 2007. 340 p.

Jolliffe I.T. Principal Component Analysis. Series in Statistics. NY: Springer, 2002. 487 p.

Munakato K., Bieber J., Yasue S., et al. A prototype muon detector network covering a full range of cosmic ray pitch angles // Proc. 27<sup>th</sup> ICRC. 2001. V. 9. P. 3494–3497.

Nagashima K., Fuji Z., Sakakibara S., et al. Report of Cosmic Ray Research Laboratory. Nagoya, 1978. N 3.

Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space // Philosophical Magazine. 1901. N 2. P. 559–572.

Sylvester J.J. On the reduction of a bilinear quantic of the  $n^{\text{th}}$  order to the form of a sum of  $n$  products by a double orthogonal substitution // Messenger of Mathematics. 1889. N 19. P. 42–46.

Yanchukovsky V.L., Kuz'menko V.S., Antsyz E.N. Results of cosmic ray monitoring with a multichannel complex // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. V. 51, N 7. P. 893–896.

## REFERENCES

- Aivazyan S.A., Buhstaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D. *Prikladnaya Statistika. Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti* [Applied statistics. Classification and dimension lowering]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1989, p. 607 (in Russian).
- Berkova M.D., Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Temperature effect of the muon component and practical issues of its account in real time. Kiraly P., Kudela K., Steglik M., Wolfendale A.W. (eds.). Proc. 21<sup>st</sup> ECRS. 2009, pp. 123–126.
- Bloch Ya.L. Standard cubic telescope. *Kosmicheskie luchy* [Cosmic Rays]. Moscow, Nauka Publ., 1961, no. 3. pp. 80–104 (in Russian).
- Borog V., Burinskiy A., Gvozdev A., Dronov V., Petrukhin A. Large aperture muon hodoscope for studies in solar-terrestrial physics. Proc. 24<sup>th</sup> ICRC. Rome. 1995, vol. 4, pp. 1291–1295.

Dmitriyeva A.N., Kokoulin R.P., Petrukhin A.A., Timashov D.A. Temperature coefficients for muons at different zenith angles. *Izvestiya RAN. Ser. Fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics]. 2009, vol. 73, no. 3, pp. 371–374 (in Russian).

Dorman L.I. *Meteorologicheskie efekty kosmicheskikh luchei* [Meteorological effects of cosmic rays]. Moscow, Nauka Publ., 1972, p. 211 (in Russian).

Dorman L.I. *Experimentalnye i teoreticheskie osnovy astrofiziki* [Experimental and Theoretical Grounds of Astrophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1975, p. 462 (in Russian).

Dubinsky J., Chaloupka P. *Meteorologické korekcie pre neutronový monitor a kukku teleskop na Lomnickom štíte. Sborn. ved. prace vysokej školy technickej v Kosiciach*. 1962, Zv. 1, pp. 87–98 (in Czech).

Esbensen K. *Analysis of Multidimensional Data. Selected Chapters*. Chernogolovka, IPHF RAN Publ., 2005, p. 160 (in Russian).

Gorban A. N., Kegl B., Wunsch D., Zinovyev A.Y. *Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction. Lecture Notes in Computational Science and Engineering*. Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 2007, p. 340

Grigoryev V.G., Krivoshapkin P.A., Krimsky G.F., Mamrukova V.P., Starodubtsev S.A., Dyachkovsky M.E. *Vse-rossiyskoy konferencii Sovremennye problemi kosmicheskoy fiziki. Yakutsk: izdatelstvo Yakutskogo nauchnogo centra SO RAN*, 2007, pp. 99–102 (in Russian).

Inozemtseva O.I., Kapitonov Yu.A. Azimuthal telescope for studying cosmic ray variations depending on the direction of primary radiation arrival. *Kosmicheskie luchy* [Cosmic rays]. Moscow, Nauka Publ., 1961, no. 3, pp. 105–121 (in Russian).

Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis. Series in Statistics*. NY: Springer, 2002, p. 487.

Libin I.Ya., Bakatov V.N., Bloch Ya.L., Voevodsky A.V., Dadikin V.L., Dorman L.I. Scintillation telescope. *Kosmicheskie luchy* [Cosmic rays]. Moscow, Nauka Publ., 1975, no. 15, pp. 137–140 (in Russian).

Munakato K., Bieber J., Yasue S., et al. A prototype muon detector network covering a full range of cosmic ray pitch angles. Proc. 27<sup>th</sup> ICRC. 2001, vol. 9, pp. 3494–3497.

Nagashima K., Fuji Z., Sakakibara S., Fujimoto K., Ueno H. Report of cosmic ray research laboratory N 3. Nagoya. 1978.

Pearson K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. *Philosophical Magazine*, 1901, no. 2, pp. 559–572.

Pomerantsev A.L. *Chemometrics in Excel: Tutorial*. Tomsk: TPU Publ., 2014, p. 435 (in Russian).

Sheply A.Kh. Guide on International Exchange of Data in Solar-Terrestrial Physics. *The 1<sup>st</sup> Workshop of International Commission on Solar-Terrestrial Physics*. Budapesht, 1969, p. 5.

Sylvester J.J. On the reduction of a bilinear quantic of the  $n^{\text{th}}$  order to the form of a sum of  $n$  products by a double orthogonal substitution. *Messenger of Mathematics*. 1889, no. 19, pp. 42–46.

Tyasto M.I. Empirical determination of temperature effect of cosmic ray rigid component on Heiss Island. *Kosmicheskie luchy* [Cosmic rays]. Moscow, Nauka Publ., 1961, no. 3, pp. 170–173 (in Russian).

Yanchukovsky V.L. Multichannel complex for cosmic ray observation. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2010, iss. 16, pp. 107–109 (in Russian).

Yanchukovsky V.L., Kuz'menko V.S., Antsyuz E.N. Results of cosmic ray monitoring with a multichannel complex. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2011, vol. 51, no. 7, pp. 893–896.