

**БАРОМЕТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НЕЙТРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ  
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ  
НА АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «МИРНЫЙ» С УЧЕТОМ ВЕТРА**

<sup>1</sup>П.Г. Кобелев, <sup>1</sup>М.С. Преображенский, <sup>1</sup>А.А. Абуни, <sup>1</sup>М.А. Абунина,  
<sup>1</sup>Д.В. Смирнов, <sup>2</sup>А.А. Луковникова

**BAROMETRIC EFFECT OF COSMIC RAY NEUTRON COMPONENT  
AT ANTARCTIC STATION “MIRNY” IN CONSIDERATION OF WIND**

<sup>1</sup>P.G. Kobelev, <sup>1</sup>M.S. Preobrajenskiy, <sup>1</sup>A.A. Abunin, <sup>1</sup>M.A. Abunina,  
<sup>1</sup>D.V. Smirnov, <sup>2</sup>A.A. Lukovnikova

Приводится оценка барометрического эффекта нейтронной компоненты космических лучей (КЛ) с учетом ветра на примере антарктической ст. «Мирный». С этой целью использовались часовые данные непрерывного мониторинга нейтронной компоненты КЛ и данные локальной метеостанции за 2007–2014 гг. Скорость ветра на обс. «Мирный» в течение двух-трех месяцев в зимний период достигает 20–40 м/с, что соответствует динамическому давлению 5–6 мбар, которое, в свою очередь, приводит к 5%-й ошибке для вариаций нейтронной компоненты из-за динамических эффектов в атмосфере. Результаты представляют интерес при регистрации нейтронной компоненты КЛ на детекторах, расположенных в высокоширотных и высокогорных районах, где эффект Бернулли в отдельные периоды может быть значительным.

Estimation of barometric coefficient for neutron component of cosmic rays was performed for Antarctic station Mirny taking into account effect of dynamic pressure caused by wind in the atmosphere. Hourly data of continue monitoring of neutron component and data of the local meteo station have been used for the period 2007–2014. Wind velocity at the observatory Mirny reaches 20–40 m/s in winter that corresponds to dynamic pressure of 5–6 mb and leads to the error of 5 % in variations of neutron component because of dynamic effect in the atmosphere. The results are interesting for high latitude and high mountain detectors, where affect Bernulli may be significant.

**Введение**

При исследовании вариаций первичного космического излучения очень эффективными является такие прецизионные детекторы как нейтронный монитор. Так, статистическая точность стандартного нейтронного супермонитора 18NM64 на уровне моря при часовом усреднении составляет ~0.15 %, поэтому остальные возможные источники ошибок необходимо обеспечить на уровне не хуже этой статистической ошибки. К таким возможным источникам, в первую очередь, относятся ошибки, связанные с исключением барометрического эффекта из данных наблюдений. Типичная точность современных датчиков давления 0.2 мбар, что дает нам требуемую точность поправок ≈0.15 %. Однако имеется еще одно, более трудно учитываемое обстоятельство. Барометрический эффект, который в первую очередь обусловлен поглощением нейтронов в атмосфере  $\beta=1/\mu$ , определяется количеством вещества над детектором, т. е. статическим давлением. Применяемые датчики давления измеряют полное давление как сумму статического и динамического давления. Задачей настоящей работы является экспериментальное определение вклада динамического давления и введение необходимых поправок в данные наблюдений.

Динамическое давление обусловлено ветровым потоком и равно кинетической энергии единичного объема вещества  $P_D = \frac{1}{2}\rho V^2$ , где  $\rho$  – плотность воздуха,  $V$  – скорость потока. Однако только часть кинетической энергии  $C_x P_D$  преобразуется в потенциальную энергию и воздействует на препятствие и, в конечном счете на показания датчика давления. Коэффициент пропорциональности  $C_x$ , или аэродинамический коэффициент, зависит от геометрии препятствия и числа Рейнольдса. Эффект ветра для от-

дельных событий исследовался ранее [Buticofe, Flugiker, 1999.], но детальный анализ не проводился.

**Используемые данные**

Регулярный мониторинг космических и метеорологических параметров на обсерватории мирный проводится с 2007 г. Анализ проводился на базе данных часового разрешения с привлечением скорости счета нейтронного монитора 12NM64, исправленных на барометрический эффект по классической методике [Kobelev et al., 2011], атмосферного давления и скорости ветра. Для оценки турбулентности потока привлекались также данные атмосферного давления и скорости ветра минутного разрешения.

На антарктических станциях, в том числе и на рассматриваемой ст. «Мирный», в связи с особенностями рельефа наблюдаются стоковые ветра. Максимальной силы стоковые ветра достигают антарктической зимой — с апреля по ноябрь они дуют почти непрерывно круглые сутки. На рис. 1 в минутном разрешении приведена наблюдаемая скорость ветра за 2009–2014 гг.

**Используемый метод**

Барометрический эффект легко исключается на основе закона поглощения излучения в атмосфере по данным отклонения измеренного атмосферного давления (предполагается, что это статическое давление  $P_S$ ) от стандартного  $P_0$  для данного пункта наблюдения

$$N_C = N_U \exp[-\beta(P_0 - P_S)], \quad (1)$$

где  $\beta=1/\mu$ , так называемый барометрический коэффициент и  $\mu$  пробег частиц в атмосфере,  $N_U$  – измеренная скорость счета детектора,  $N_C$  – скорость счета детектора, приведенная к стандартному уровню  $P_0$ .

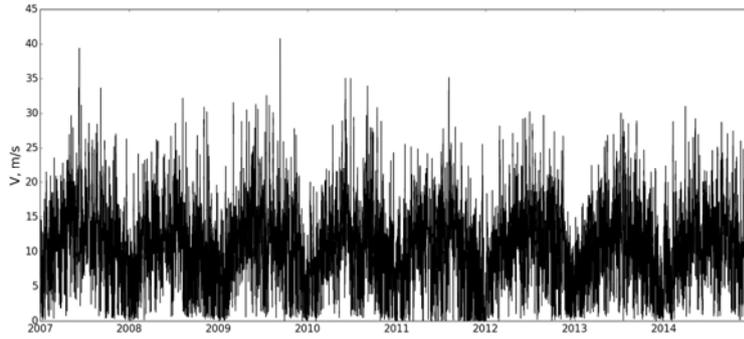


Рис. 1. Наблюдаемая на obs. «Мирный» скорость ветра.

Поскольку измеряемое применяемыми датчиками барометрическое давление  $P$  есть сумма статического и динамического давления в данной точке атмосферы, то статическое давление равно разности измеренного  $P$  и динамического давления, т. е.  $P - C_x P_D$ .

Исправленную на барометрический эффект (давление статическое) скорость счета детектора  $N_C$  можно представить как:

$$N_C = N_U e^{-\beta[P_0 - (P - C_x P_D)]} = \underbrace{N_U \exp(-\beta(P_0 - P))}_{N_C^0} \exp(-\beta C_x P_D), \quad (2)$$

где  $N_U$  – зарегистрированная скорость счета детектора в данный момент и  $P_0$  – среднее давление за временной интервал. Барометрический коэффициент  $\beta > 0$  ( $\beta$  для ст. «Мирный» равен 0.73 %/mb,  $P_0 = 980$  mb) определяется в спокойный и безветренный период. Логарифмируя уравнение (1) и перенося слагаемые с неизвестными в правую часть, получим

$$\ln N_C^0 = \ln N_C + \beta C_x P_D \text{ или } y = a + cx$$

где  $y = \ln N_C^0$ ,  $a = \ln N_C$ ,  $x = \beta P_D$ , т. е. линейное относительно  $a$  и  $c$  уравнение регрессии.

#### Коррекция данных на первичные вариации

При решении задачи оценки барометрического эффекта измеряемую скорость счета детектора  $N_U$  нужно освободить от первичных вариаций. Это можно сделать, если  $N_U$  заменить на  $N_U / (1 + v)$ , где  $v$  – первичные вариации для данного пункта. Тогда уравнение (2) запишется как:

$$N_C = \underbrace{N_U / (1 + v)}_{N_C^0} \exp(-\beta(P_0 - P)) \exp(-\beta C_x P_D), \quad (3)$$

В приближении нулевой гармоники первичные вариации можно исключить по данным опорной близкорасположенной станции  $S$  следующим образом. Запишем вариации для двух детекторов как

$$v = a_{10} C_0 \text{ и } v^S = a_{10} C_0^S.$$

Освобождаясь от неизвестной амплитуды нулевой гармоники  $a_{10}$ , получим

$$v = v^S \frac{C_0}{C_0^S}. \quad (4)$$

Выражение (4) учитывает различие параметров

станций (высоту, жесткость геомагнитного обреза) и, в принципе, позволяет привлекать любую станцию в качестве опорной.

#### Полученные результаты

Для анализа было отобрано около десятка событий, когда наблюдавшаяся скорость ветра превышала 30 м/с. Для примера приведем рекордное событие сентября 2009 г., когда максимальная скорость ветра достигала 42 м/с. На рис. 2 показана корреляционная связь между скоростью счета и вычисленным динамическим давлением  $P_D$ . Скорость счета (серые кружки) по изложенной выше методике (формула 4) была скорректирована на первичные вариации (черные кружки). Корреляционный анализ для этого события приводит к аэродинамическому коэффициенту  $C_x = 0.63 \pm 0.03$ , коэффициент корреляции равен 0.93. Из всех рассматриваемых событий такой коэффициент корреляции оказался наилучшим.

Строго говоря, аэродинамический коэффициент зависит от значения числа Рейнольдса, которое пропорционально скорости ветра. Но в ограниченном диапазоне рассматриваемых скоростей такой зависимостью можно пренебречь, если оцениваемые нами числа Рейнольдса вне критической области кризиса сопротивления. [Шакина, 2013].

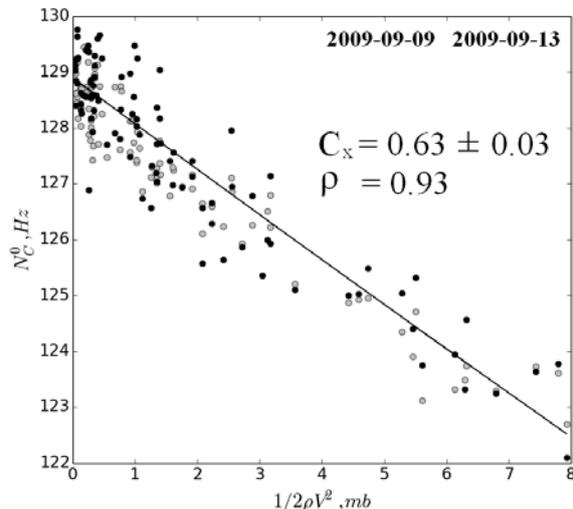


Рис. 2. Корреляционная зависимость неисправленной и исправленной на первичные вариации скорости счета (серые и черные точки соответственно) от динамического давления ветра, кривая – МНК-аппроксимация для исправленных данных.

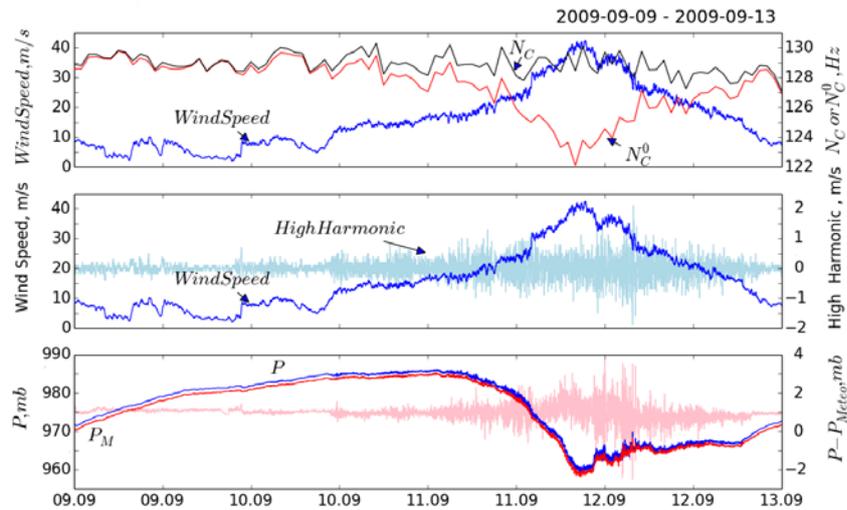


Рис. 3. Временные зависимости исправленных на барометрический эффект скорости счета без- и с учетом влияния ветра ( $N_C^0$  и  $N_C$ ), а также значение скорости ветра (верхняя панель). Временная зависимость значений скорости ветра в минутном разрешении и фильтр соседних разностей (средняя панель). Показания двух датчиков давления и их разность (нижняя панель).

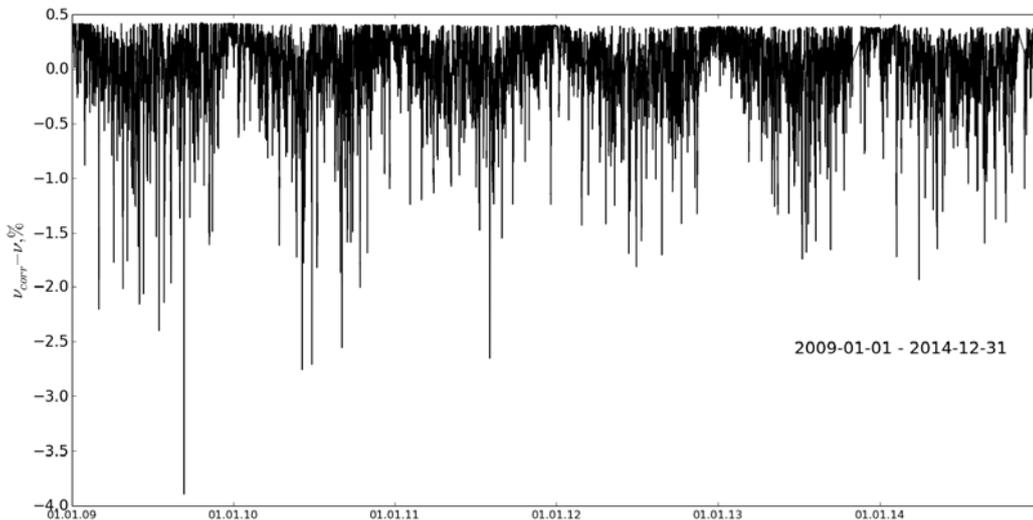


Рис. 4. Поправка на динамический эффект для наблюдаемых вариаций космических лучей для периода 2009–2014 гг.

Детали анализа представлены на рис. 3. На верхней части рисунка изображены временные зависимости исправленных на барометрический эффект скорости счета без- и с учетом влияния ветра, а также само значение скорости. Четко видна хорошая антикорреляция скорости счета детектора  $N_C^0$  и скорости ветра, которая полностью снимается после коррекции на динамический эффект в соответствии с выражением (4). В средней части рисунка представлены временная зависимость значений скорости ветра (в минутном разрешении) и фильтр соседних разностей. Видно, что при скоростях ветра более 15 м/с возрастает турбулентность потока; этот факт следует учесть при проведении дальнейших исследований. В нижней части – показания двух датчиков давления и их разность (минутное разрешение): согласно этим результатам, показания разнесенных в пространстве датчиков давления идентичны в слабовеетренные периоды и флуктуируют при больших скоростях, что подтверждает турбулентность пото-

ков. Турбулентность, наблюдаемая для давления свободного датчика  $P_M$ , меньше, чем в случае датчика давления  $P$  в здании, что связано с условием обтекания воздушным потоком здания.

Полученные аэродинамические коэффициенты  $C_x$  позволяют учесть динамический эффект для всего периода наблюдений, что показано на рис. 4. Если учесть, что точность наблюдаемых вариаций десятые доли процента, то возможная ошибка за счет динамического эффекта, как следует из рисунка, при больших ветрах достигает нескольких процентов.

### Выводы

Показано, что на ст. «Мирный», где часто значения скорости ветра достигают больших величин, абсолютная ошибка в определении вариаций может достигать 2–4 % и, таким образом, для получения точных данных всегда необходимо проводить перерасчет барометрического эффекта с учетом динамического эффекта ветра. Для выявления зависимости

аэродинамического коэффициента от числа Рейнольдса необходимо число рассматриваемых событий. Кроме того, очень важно рассмотреть динамические эффекты для других полярных детекторов, в первую очередь нейтронный монитор Mawson, где наблюдаются самые большие регулярные ветровые потоки. Очень важно также привлечь данные горных детекторов, существуют совершенно другие условия обтекания препятствий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Шакина Н.П. Лекции по динамической метеорологии. М.: ТРИАДА ЛТД, 2013. 160 с. <http://method.meteorf.ru/publ/books/lectures/lectures.pdf>.

Buticofe R., Flugiker E.O. Pressure correction of GLE measurements in turbulent winds // Proc. 26<sup>th</sup> ICRC, Salt Lake City, 1999. V. 6. P. 395–398.

Dorman L.I., Villorosi G., Iucci N., et al. Cosmic ray survey to Antarctica and coupling functions for neutron component in solar minimum (1996–1997). 3. Geomagnetic effects and coupling functions”, Proc. of 26<sup>th</sup> Intern. Cosmic Ray Conference, Salt Lake City, 1999. V. 7. P. 382–385.

Dubinsky J., Chaloupka P., Kowalsky T. Mat.-fys. casop. 1960. V. 10, N 1. P. 57.

Kawasaki S. On the anomalous barometric coefficient of cosmic-ray neutron monitor at Mt. Norikura. Sci. Rep. of Inst. Phys. Chem. Res. 1972. V. 66(2). P. 25–32.

Kobelev P., Belov A., Mavromichalaki E., et al. Variations of Barometric Coefficients of the Neutron Component in the 22–23 Cycles of Solar Activity, Proc. 32<sup>nd</sup> ICRC, 2011.

Lockwood J.A., Calawa A.R. On the barometric pressure coefficient for cosmic ray neutrons // J. Atmos. Terr. Phys. 1961. V. 11. P. 23.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия  
Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*