

УДК 524.1

ЭФФЕКТ СНЕГА В ВАРИАЦИЯХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И МЕТОДЫ ЕГО УЧЕТА

© 2011 г. В. К. Коротков¹, М. Д. Беркова², А. В. Белов², Е. А. Ерошенко²,
П. Г. Кобелев², В. Г. Янке²

¹ Учреждение РАН Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
пос. Паратунка (Камчатская обл.)

² Учреждение РАН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова,
г. Троицк (Московская обл.)

e-mail: yanke@izmiran.ru

Поступила в редакцию 26.11.2009 г.

После доработки 07.04.2010 г.

Описана методика, позволяющая исключить влияние снежного покрова из данных нейтронной компоненты вторичного космического излучения. Учет влияния снега исключительно важен для многих приполярных, высокоширотных и горных станций, на которых ведется непрерывная регистрация космических лучей. Сравниваются результаты исправления измерений на эффект снега вручную и автоматически на основе выработанного алгоритма. Описываемая методика была опробована для ряда станций космических лучей, на которых в зимний период вблизи или над детектором наблюдаются скопления больших масс снега: Магадан, г. Хермон, Юнгфрауиох и Наин.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для некоторых станций, особенно горных среднеширотных и низкоширотных, снег является большой проблемой, поскольку вследствие высокой влажности он эффективно накапливается над детектором и вокруг него. Из-за труднодоступности большинства таких станций удалить снег механически не представляется возможным. Поэтому данные мониторинга нейтронной компоненты, подверженные влиянию снега, для дальнейшего использования требуют соответствующей корректировки.

Природа эффекта снега двоякая. С одной стороны, снежный покров над детектором является дополнительным поглотителем, и это проявляется в понижении скорости счета детектора. С другой стороны, большие массы снега вокруг детектора и в непосредственной близости к нему рассеивают падающий сверху поток нейтронов, как бы направляя дополнительные нейтроны на детектор, что приводит к повышению скорости счета. Оба эти эффекта конкурируют друг с другом, но чаще всего доминирует эффект поглощения.

Данные мониторинга, сильно искаженные переменным слоем снега, не пригодны для изучения многих типов вариаций. Однако мы научились исключать имеющий такую же природу достаточно большой барометрический эффект, привлекая данные прецизионного атмосферного давления. Поэтому, казалось бы, измеряя толщину снежного покрова, можно легко внести соответствующие поправки.

Действительно, если в отсутствии снега скорость счета детектора N_i^{cor} , то скорость счета детектора вследствие поглощения с некоторым эффективным пробегом L (предположим, L не зависит от энергии) в толще снега x_i равна $N_i = N_i^{cor} \exp(-x_i/L)$. Отсюда восстановленная скорость счета

$$N_i^{cor} = N_i/\varepsilon, \text{ где } \varepsilon = \exp(-x_i/L). \quad (1)$$

На рис. 1 схематически показано изменение скорости счета N_i детектора вследствие эффекта снега. Формально это можно рассматривать как изменение эффективности ε детектора, т.е. рассматривать как изменение каких-то свойств детектора или условий наблюдения. Если бы мы знали толщину снежного покрова, то данные легко было бы исправить на эффект снега [Blomster et al., 1969; Dorman et al., 1971]. Но точные данные о толщине снега невозможно получить из-за труднодоступности станций. В то же время речь всегда идет о некоторой эффективной толщине снежного покрова, который накапливается вокруг детектора сложным образом. С солнечной стороны снег подтаивает быстрее, тем самым еще больше усиливая неравномерность массы вблизи детектора. Поэтому приходится искать другие приближенные методы учета снежного эффекта. Один из них базируется на сравнении вариаций, регистрируемых на рассматриваемой станции, с вариациями на опорной станции, на которой нет проблем со снегом. Это не идеальное решение, поскольку детектор, окруженный снегом, имеет не-

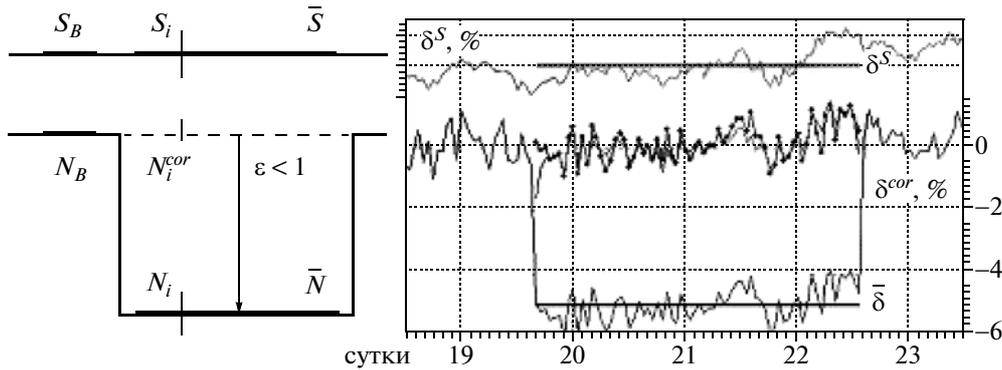


Рис. 1. Схематическая скорость счета опорной станции S и станции, данные которой искажены эффектом снега. Справа – вариации скорости счета опорной станции S (Москва) и MCRL для марта 2009 г.

сколько иные функции связи, но, как показано в данной работе, этот метод является достаточно хорошим приближением. Кроме того, это приближенная оценка, поскольку на характер поглощения нейтронов в толще снежного покрова влияет так называемый пограничный эффект “воздух-снег-грунт”, и необходимо рассматривать двухкомпонентную кривую поглощения с быстро и медленно затухающим потоком нейтронов [Raquet et al., 2007].

Цель работы – разработка методики, позволяющей исключить влияние толщины снежного покрова из данных мониторинга нейтронной компоненты вторичного космического излучения.

2. МЕТОДИКА ОСВОБОЖДЕНИЯ ОТ ЭФФЕКТА СНЕГА

Рассмотрим почти идеальный случай – резкое выпадение снега, который через некоторое время был механически удален. Такой случай смоделирован нами и показан на рис. 1.

Опираясь на (1), вариации относительно базового периода δ^{cor} , исправленные на эффект снега и выраженные через измеряемые вариации δ , можно записать как

$$\delta_i^{cor} = \frac{N_i^{cor}}{N_B} - 1 = \frac{N_i/\epsilon}{N_B} - 1 = (\delta_i + 1)/\epsilon - 1. \quad (2)$$

Скорость счета в базовый период обозначена как N_B . Из (2) видно, что для определения исправленных на снег вариаций δ^{cor} по измеряемым вариациям δ , необходимо выполнить оценку эффективности ϵ . С этой целью привлечем данные детектора, регистрирующие примерно такие же вариации δ^S , что и детектор, подверженный влиянию снега δ^{cor} , т.е. $\delta^S \cong \delta^{cor}$. Критерий выбора опорного детектора будет обсужден ниже. Если это условие применить к

некоторому усредненному временному интервалу, то можно записать, что $\frac{\bar{S}}{S_B} - 1 = \frac{\bar{N}/\epsilon}{N_B} - 1$, или

$$\epsilon = \frac{\bar{N}/N_B}{\bar{S}/S_B} = \frac{\bar{\delta} + 1}{\bar{\delta}^S + 1}. \quad (3)$$

Таким образом, вычислив за некоторый интервал средние вариации исправляемого детектора $\bar{\delta}$ и опорного детектора $\bar{\delta}^S$, мы, согласно (3), можем определить среднюю для этого интервала эффективность ϵ и, следовательно, исправленные на эффект снега вариации детектора в соответствии с выражением (2).

На рис. 1 приведены исправленные данные по описанной выше методике. Именно таким образом проводится “ручное” исправление данных: визуально выбирается интервал, вычисляется эффективность в соответствии с (3) и корректируются данные, как это следует из (2). Представленное на рис. 1 событие во всех случаях – идеальное событие. Во-первых, очень быстрый столбообразный переходный процесс, во-вторых, толщина снега на протяжении всего периода не менялась. Реально же толщина снега по разным причинам меняется со временем. Поэтому описанную выше методику необходимо обобщить с учетом реальной ситуации. В первую очередь необходимо выработать критерий усреднения $\bar{\delta}$ и $\bar{\delta}^S$ для вычисления эффективности.

3. УСРЕДНЕНИЕ И ФИЛЬТРАЦИЯ ДАННЫХ

При определении эффективности в рассмотренном выше примере на рис. 1 использовалась аппроксимация в виде линейной функции, которая является частным случаем фильтра низких частот. При этом была выделена низкочастотная составляющая сигнала, и в нашем простом случае она определялась просто как среднее значение на выделенном интервале. Однако, регрессия часто уничтожает информа-

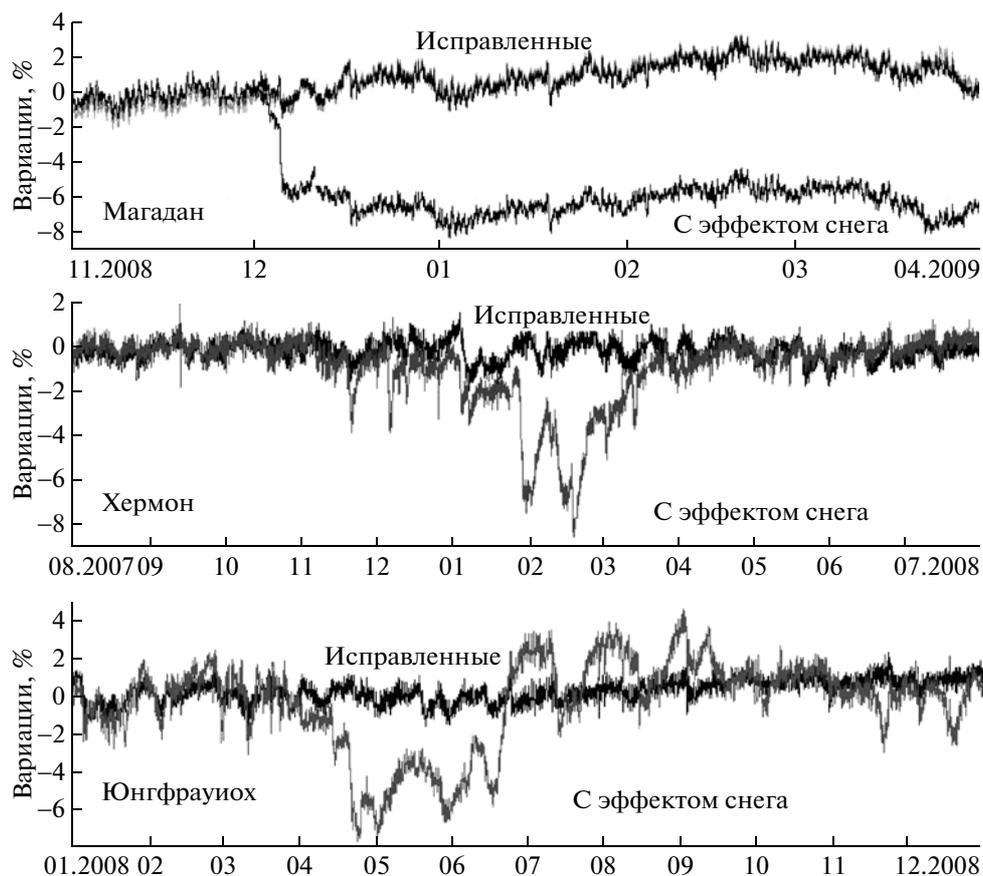


Рис. 2. Искаженные эффектом снега и исправленные данные станций: Магадан – опорная ст. Москва (черная кривая – сглаживание Гаусса, серая – сглаживание полиномом); г. Хермон – опорная ст. Рим; Юнгфрауиох (Зпт64) – опорные станции: Юнгфрауиох (18IGY) – черная кривая, Рим – серая.

тивную составляющую данных, оставляя лишь наперед заданную исследователем зависимость. В связи с этим, регрессия очень эффективна, когда заранее известен или хорошо угадывается закон распределения данных. Но, в общем случае необходимо применить процедуру фильтрации данных с целью выделения низкочастотной составляющей сигнала, его тренда [Хемминг, 1987; Ярославский, 1979]. Такую фильтрацию можно выполнить, используя полиномы различной степени или применяя линейные фильтры. Фильтры должны обладать хорошей реакцией на скачок, поскольку снег в начальный момент может накапливаться достаточно быстро или через некоторое время может быть устранен механически.

Аппроксимация полиномом была проведена для полинома $y_n = \sum_{i=0}^m a_i n^i$ достаточно высокой степени m , где n – порядковый номер часа в месяце. Результат для Магадана приведен на рис. 2. В случае полиномиальной регрессии видна очень хорошая реакция на скачок в начале декабря.

Простой фильтр скользящего среднего, несмотря на свою простоту, оптимален для большинства

задач. Уравнение фильтра скользящего среднего записывается как $y_n = \sum_{i=-m}^m c_i x_{n+i}$ с постоянным весовым коэффициентом $c_i = 1/(2m+1)$ или еще проще в рекурсивной форме после первого шага вычислений $y_n = y_{n-1} - x_{n-1-m} + x_{n+m}$. Передаточная функция фильтра скользящего среднего порядка $(2m+1)$ равна $H(\omega) = \frac{\sin((2m+1)\omega/2)}{(2m+1)\sin(\omega/2)}$. Здесь ω – безразмерная частота, равная отношению частоты сигнала ω_0 к частоте дискретизации ω_d и принимающая значения в интервале от 0 до 0.5 [Хемминг, 1987, Васильев и др., 2007]. В нашей задаче мы используем ряды с часовыми данными, так что период, соответствующий частоте дискретизации, равен одному часу. Число отсчетов m определяется конкретной задачей. В случае с эффектом снега может возникнуть необходимость сглаживания на интервале от нескольких часов до нескольких суток.

Фильтр нижних частот Гаусса – вариант фильтра скользящего среднего, в котором в качестве ве-

совой функции используется функция Гаусса – реализуется как

$$y_n = \sum_{i=-m}^m c_i x_{n+i}$$

Весовые коэффициенты задаются как $c_i = \exp(-i^2/\sigma^2)/C$, а коэффициент нормировки – $C = \sum_{i=-m}^m \exp(-i^2/\sigma^2)$. Значение дисперсии σ^2 задает необходимую ширину распределения.

Выбор порядка фильтра в нашей задаче несколько противоречив, поскольку характерные периоды суточных вариаций космических лучей и суточных изменений в толщине снежного покрова в процессе таяния снега днем частично совпадают. Изменения толщины снежного покрова в целом более медленные. Хотя, в случае резкого снегопада могут возникнуть скачкообразные изменения.

Поэтому, для наших часовых данных по умолчанию применялся двусторонний фильтр по 11-ти точкам от центральной точки или, другими словами, фильтр порядка 23, что равно примерно суткам. В случае применения фильтра Гаусса, для полуширины было выбрано значение $\sigma = 8$. В нашем случае интервал $\pm 3\sigma$ соответствует двум суткам, а эффективная ширина такого фильтра равна примерно суткам. Здесь приходилось делать компромиссный выбор между скачкообразным изменением сигнала и достаточно медленным его изменением с характерным периодом в несколько суток. Кроме того, в нашей задаче вопрос эффективности математических вычислений не главный, и при прочих равных условиях, преимущества фильтра Гаусса перед фильтром скользящего среднего мы не выявили.

4. КРИТЕРИЙ ВЫБОРА ОПОРНОЙ СТАНЦИИ

При выборе опорной станции идеальным случаем является наличие на одной станции двух детекторов, один из которых практически не подвержен влиянию снега. Примером могут быть детекторы MCRL и 24nm64 на ст. Москва, или детекторы на ст. Юнгфрауих (детектор с эффектом снега 3nm64 и детектор 18IGY, практически не подверженный влиянию снега). Несколько меньшая статистика 18IGY не имеет большого значения, поскольку данные этого детектора используются после обработки низкочастотным фильтром. Для детектора г. Хермон в качестве опорной можно использовать только какую-нибудь расположенную относительно недалеко станцию, например, Рим. Для ст. Наин в качестве опорной станции рассматривались два варианта: Инувик и Апатиты. В результате предпочтение было отдано ст. Инувик, как расположенной намного ближе к ст. Наин. Для ст. Магадан опорной станцией может быть Якутск. Однако, использовать

такие удаленные опорные станции нужно с известной степенью осторожности. Единственный верный путь – это определить ожидаемые в данном пункте вариации по результатам модели вариаций, например, методом глобальной съемки, и использовать результат в качестве опорных данных. Это очень трудоемкий путь, но, если воспользоваться результатами Интернет-проекта, описанного в работе [Asipenka et al., 2008a; 2008b] и находящегося по адресу <http://cr20.izmiran.rssi.ru/AnisotropyCR/Index.php>, то можно вычислить ожидаемые вариации с учетом нулевой и первой гармоник в заданном пункте для любого момента времени. Такая процедура с достаточной точностью гарантирует корректное решение задачи.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для события, приведенного на рис. 1, было проведено автоматическое исправление данных, результат которого затем сравнивался с результатом ручной коррекции. При этом также проверялась реакция на скачок. Результаты ручной коррекции (кривая с точками) и автоматической коррекции (сплошная кривая) показаны на рис. 1, где видно хорошее согласие. Хотя, для уменьшения искажений в момент скачка, лучше было бы применить достаточно узкий фильтр Гаусса порядка 6-ти часов.

Для ст. Магадан результаты автоматической коррекции данных на снег приведены на рис. 2. На этой станции с первых чисел декабря до 4–5 декабря 2008 г. наблюдался сильный снег, далее до 16 декабря продолжался небольшой снег. Максимальный измеренный вес снега 11–12 г/см². После 16 декабря 2008 г. по 20 марта 2009 г. снег не выпал. Умеренный снегопад наблюдался с 21–30 марта 2009 г. Измеренный вес снега в конце этого периода 10–11 г/см².

На рис. 3 показана эффективность детектора за этот же период. Если найдена эффективность, то, следуя (1), можно произвести оценку эффективной толщины снежного покрова как $x = L \ln(N_i^{cor}/N_i)$. Это справедливо, если снег равномерно размещен по всей площади, находящейся в пределах диаграммы направленности детектора. Толщина снежного покрова, которая сравнивается с непосредственными измерениями толщины снега, также показана на рис. 3.

На ст. Магадан в первой половине декабря, когда шел снег, эффективность понизилась до минимальной величины и оставалась постоянной до конца марта. По рассогласованию постоянного значения эффективности за этот период и эффективности, определяемой при постоянной толщине снежного покрова, можно судить о возможных ошибках применяемой методики. Так, ошибка может быть обусловлена медленным уменьшением толщины снега за счет выветривания снега (виден отрицательный

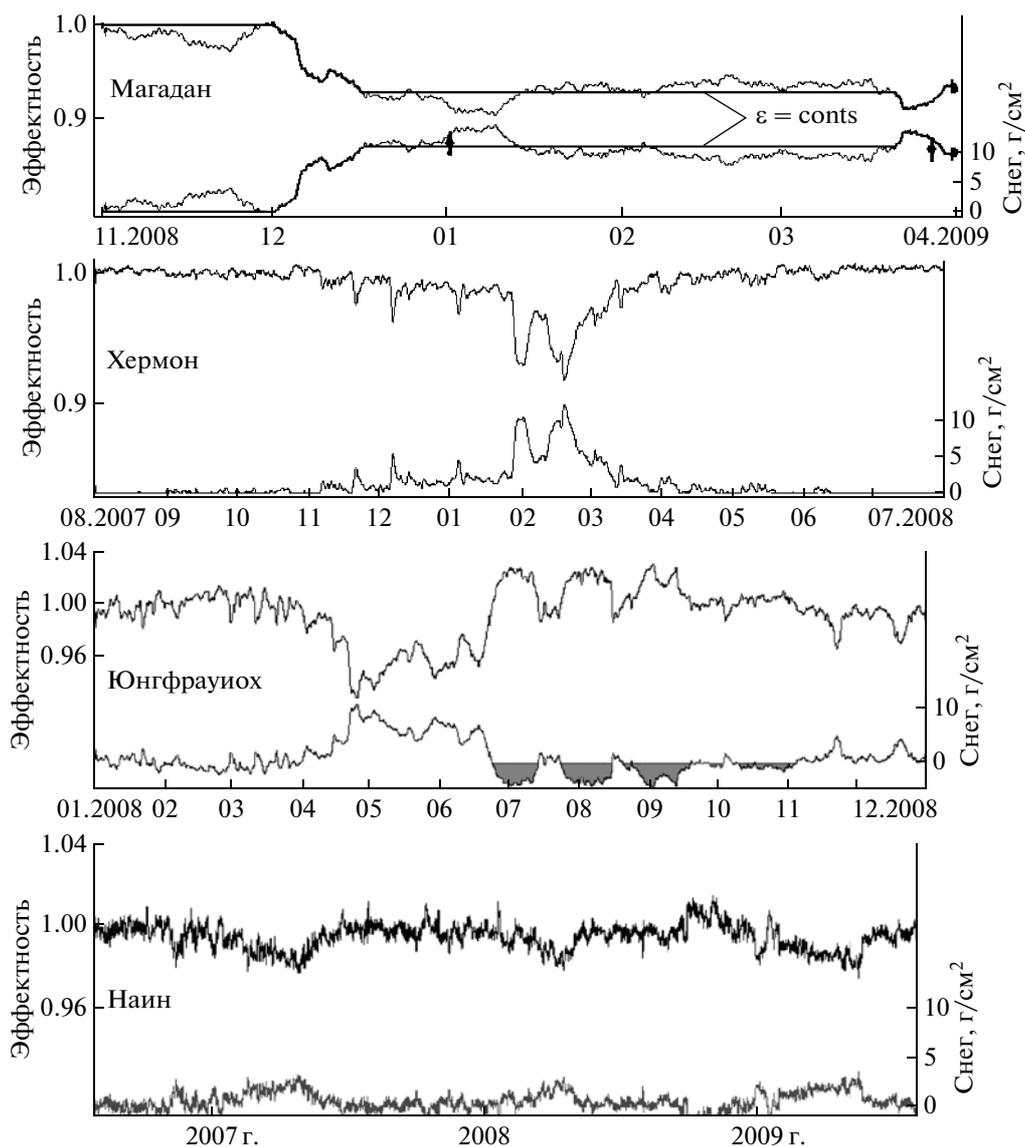


Рис. 3. Эффективность и толщина снега для станций: Магадан, г. Хермон, Юнгфрауиох и Наин.

тренд в толщине снега), дрейфа опорной станции. Поэтому описываемую методику целесообразно применять только для периодов активного снегопада, а в остальные периоды учитывать постоянные значения эффективности.

На ст. г. Хермон наблюдения начались в 1998 г. Из-за особенностей влажного горного климата в зимний период постоянно возникают большие проблемы с влиянием снега на данные мониторинга. Типичное поведение вариаций показано на рис. 2. При введении поправок в качестве опорной станции использовалась ст. Рим. Хотя, это и не оптимальный вариант, поскольку и жесткости геомагнитного обрезания достаточно сильно отличаются, и ст. Рим не горная, но, в то же время, она обладает хорошей статистикой и работает очень стабильно.

На рис. 4 на примере марта месяца 2009 г. для ст. г. Хермон проводится сравнение ручной и автоматизированной методик. Также видно очень хорошее согласие.

На рис. 3 приведены эффективность и динамика изменения толщины снега за зимний период 2007–2008 гг. Видно, что данные ст. г. Хермон четыре-пять месяцев в году сильно искажены снегом.

При применении сглаживающих фильтров важна полнота данных исправляемой и опорной станции, в противном случае в разрывах будут наблюдаться сильные искажения. Искажения будут наблюдаться не только после разрыва, но и до него, определяемые шириной фильтра, т.е. фактически данные для этого интервала будут испорчены. Чтобы избежать этого, мы заменяли пропуски данных



Рис. 4. Сверху — автоматическое (черная кривая) и ручное (серая кривая) исправление данных за март 2009 г. для ст. Хермон. Снизу — не исправленные данные.

средними значениями, а на заключительном этапе удаляли эти периоды, заменяя их опять пропусками.

На ст. Юнгфрауих работают два детектора 18IGY и 3m64. Последний детектор работает с 1987 г. и подвержен влиянию снега. Типичное поведение вариаций показано на рис. 2. При введении поправок в качестве опорной станции использовался детектор 18IGY, а для контроля использовались данные ст. Рим примерно с такой же статистикой.

На рис. 2 видно, что в апреле—июне 2008 г. наблюдается понижение скорости счета за счет поглощения в толще снега над детектором, а в июне—сентябре — повышение скорости за счет бокового накопления снега. Это типичная картина, которая наблюдается на данной станции и в другие годы с 2002 по 2008 гг. На рис. 3 приведены эффективность и динамика изменения толщины снега за весь 2008 г. Видно, что данные станции четыре-пять месяцев в году сильно искажены снегом, в апреле—июне доминирует эффект поглощения в толще снега над детектором, а в июне—сентябре — эффект бокового накопления снега (отрицательные значения толщины снега).

Для ст. Наин данные детектора были обработаны за три последних года с августа 2006 г. по июль 2009 г. На рис. 3 приведены эффективность и толщина снежного покрова за этот период. Хорошо видно, что проблемы со снегом на ст. Наин не столь значительны, как на других станциях. Тем не менее, данные детектора ежегодно искажены снегом с ноября—декабря по апрель—май. При этом эффективность детекторов понижается на 2–3%, а толщина снежного покрова не превышает 4 г/см².

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Для нескольких станций — Магадан, г. Хермон, Юнгфрауих и Наин — апробирована методика освобождения данных от влияния снега. Методика основана на сравнении вариаций тестируемой и опорной станций. Рассогласованность вариаций на этих станциях определяет влияние снежного покрова на данные одной из них, в то время как другая станция принимается за опорную. Для численной оценки и освобождения данных от влияния снежного покрова проводилось усреднение с целью выявления характерных трендов, связанных с динамикой толщины снежного покрова. Для этого применялись фильтры нижних частот, при подборе которых приходилось делать компромиссный выбор между скачкообразным изменением сигнала и достаточно медленным его изменением с характерным периодом в несколько суток. По умолчанию эффективная ширина фильтра принималась равной почти суткам.

В данной работе фильтром нижних частот обрабатывались ряды данных за целый год. Реально же данные, измененные эффектом снега, составляют периоды от нескольких дней до нескольких месяцев. Как видно из приведенных рисунков, хорошо подобранный фильтр практически не искажает свободных от эффекта снега данных. Тем не менее, в дальнейшем желательно применять ФНЧ только к данным со снегом, прибавляя по краям данные до снега и после на интервале, равном полуширине фильтра, а после обработки удалять добавленные интервалы с обеих сторон. Это позволит избежать нежелательной коррекции вариаций, имеющих другую природу, и исключить краевые эффекты. Поскольку вопрос эффективности математических вычислений не главный, при прочих равных усло-

виях преимущества фильтра Гаусса перед простым фильтром скользящего среднего не выявлены.

Точность, с которой можно освободить данные от влияния снега, составляет 0.3–0.4%. Идеальным является случай, когда детекторы идентичны и находятся в одном пункте, что гарантирует одинаковые вариации. Подбор близкорасположенной опорной станции возможен, но требует проверки близости вариации на этих станциях. Универсальной, хотя и несколько трудоемкой, является оценка ожидаемых вариаций на основе модели вариаций, базирующаяся на данных Мировой сети.

Описываемая в данной работе методика позволяет не только исключить эффект снега, но и оценить эффективную толщину снежного покрова.

Если применять односторонние фильтры, то данная методика может быть применена и в режиме реального времени.

Работа поддержана грантами РФФИ № 10-02-00175а, 10-02-00989а, FP7 N 213007 nmdb, программой No 6 BR ФИ Президиума РАН “Нейтринная физика и Астрофизика”. Наши благодарности также <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou/main.htm>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Васильев В.П., Муро Э.Л., Смольский С.М. Основы теории и расчета цифровых фильтров. Учеб. пособие для вузов. М.: ИЦ “Академия”, 2007.
- Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, Финансы и статистика, 1995.
- Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. М.: Недра, 1987.
- Ярославский Л.П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: Советское радио, 1979.
- Asipenka A.S., Belov A.V., Eroshenko E.A., Klepach E.G., Oleneva V.A., Yanke V.G. Interactive Database of Cosmic Ray Anisotropy (DB A10). Proc. 30th ICRC, Mexico. V. 1. P. 629–632. 2008a.
- Asipenka A.S., Belov A.V., Eroshenko E.F., Klepach E.G., Yanke V.G. Interactive database on the cosmic ray anisotropy // Adv. Space Res. doi:10.1016/j.asr.2008.09.022. 2008b.
- Blomster K.A., Tanskanen P.J. The influence of snow and water on the different multiplicities as observed in a neutron monitor NM-64 in Oulu. Proceedings of the 11th ICRC, Budapest. V. 2. Acta Physica. Supplement to V. 29. P. 627. 1969.
- Dorman L.I., Yanke V.G. To the theory of cosmic ray meteorological effects // Izvestia Academy of Sciences USSR. Series Phys. V. 35. № 12. P. 2556–2570. 1971.
- Paquet E., Laval M., Belov A.V., Eroshenko E.F., Kartyshov V.G., Struminsky A.B., Yanke V.G. An application of cosmic-ray neutron measurements to the determination of the snow water equivalent. V. 1. P. 761–764. ICRC 30th, Mexico. 2007.