

УДК 524.1-352

МЕТОД КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ НА ЭФФЕКТ СНЕГА

© 2022 г. П. Г. Кобелев¹, *, Л. А. Трефилова¹, В. А. Оленева¹, В. Г. Янке¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: kobelev@izmiran.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принята к публикации 20.07.2022 г.

Проведена оценка влияния накапливающегося снежного покрова вокруг мест расположения горных, среднеширотных и высокоширотных нейтронных мониторов мировой сети на качество их данных. Предложена поправка на эффект снега по методу опорных станций. Кроме того, по данной методике для точек наблюдения оценена эффективная толщина снежного покрова. Проведено сравнение различных имеющихся методов коррекции влияния снега на результат мониторинга и предлагается новый метод, опирающийся на результат анализа данных мировой сети нейтронных мониторов.

DOI: 10.31857/S0016794022060086

1. ВВЕДЕНИЕ

Снег является существенной проблемой для нейтронного мониторинга, поскольку вследствие высокой влажности может происходить значительное его накопление над анализируемым детектором и вокруг него; это максимально выражено на среднеширотных горных станциях. Из-за труднодоступности на большинстве таких станций удалить снег механически не представляется возможным, и данные мониторинга существенно искажаются слоем снега переменной толщины, становясь непригодными для изучения многих типов вариаций. Отсюда следует необходимость корректировки данных на воздействие снежного покрова для их дальнейшего использования. При базовой точности регистрации нейтронного монитора 18NM64 0.15%, уже при накоплении 1 см плотного снега непосредственно над детектором, что в переводе на водный эквивалент (в. э.) приблизительно равно 0.5 см в. э., происходит искажение наблюдаемых вариаций на ~0.4%.

Природа воздействия снега на скорость счета нейтронных мониторов двоякая. В первую очередь, снежный покров над детектором играет роль дополнительного поглотителя, приводя к снижению скорости счета. Кроме того, некоторое количество регистрируемых нейтронов генерируется в окружающем детектор веществе, большей частью в грунте. Соответственно, экранирование грунта слоем снега также приводит к некоторому понижению скорости счета. Ранее эффект снега

рассматривался в работах [Коротков и др., 2011; Korotkov et al., 2013; Kobelev et al., 2020], в которых также дан обзор работ по данной тематике.

В этих работах для коррекции данных анализируемой станции применялся метод опорных станций, в качестве которых привлекался ряд заведомо бесснежных и малоснежных станций. Также в них проведено тестирование различных цифровых фильтров: аппроксимации полиномом высокой степени, простого фильтра скользящего среднего, фильтра нижних частот Гаусса. Были сделаны выводы об отсутствии необходимости использования сложных фильтров, а также о невозможности обеспечения непрерывности данных опорных станций. Отсутствие данных опорной станции приводит к потере данных в исходном ряде и к их искажению на границах отсутствующего интервала.

Следовательно, необходимо разработать алгоритм, свободный от этих недостатков. В данной работе решается проблема непрерывности данных опорной станции. Как было установлено, эту задачу можно решить, привлекая результаты анализа данных мировой сети нейтронных мониторов глобальным спектрографическим методом (GSM) [Крымский и др., 1966; Nagashima, 1971; Belov et al., 1983, 2018]. Такой подход обеспечивает 100-процентную непрерывность и на полпорядка лучшую статистическую-точность.

Задача настоящей работы заключается в разработке методики учета снежного покрова, базиру-



Рис. 1. Накопление снега: слева – вокруг клетки Фарадея на станции космических лучей ESOI (Голанские высоты) [Dorman et al., 2003], справа – на шатровой крыше и вокруг ст. Москва.

ющейся на результатах GSM-анализа. При этом используется простой фильтр скользящего среднего.

2. ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Существующие методики позволяют с необходимой точностью исключить барометрический эффект, имеющий схожую природу с эффектом снега, путем привлечения прецизионных данных об атмосферном давлении. Далее, зная величину снежного покрова в сантиметрах водного эквивалента (далее – толщина снежного покрова), можно внести соответствующие поправки. Если в отсутствие снега скорость счета анализируемого детектора N_i^{cor} для каждого момента времени i , то скорость счета анализируемого детектора вследствие поглощения с некоторым эффективным пробегом L в толще снега x_i равна $N_i = N_i^{cor} \exp(-x_i/L)$. Отсюда восстановленная скорость счета

$$N_i^{cor} = N_i / \epsilon_i, \tag{1}$$

где

$$\epsilon_i = \exp(-x_i/L), \tag{2}$$

что можно рассматривать как изменение эффективности (т.е. изменение свойств анализируемого детектора или условий наблюдения) в зависимости от толщины снежного покрова.

Таким образом, при известной толщине снежного покрова скорость счета можно было бы легко исправить на эффект снега [Blomster and Tanskanen, 1969] прямым методом. Однако точные данные о толщине снега невозможно получить из-за труднодоступности большинства высокогорных станций. В конечном счете, речь идет о некоторой эф-

фективной толщине снежного покрова, поскольку большую роль играет общая неравномерность накопления слоя снега в зависимости от формы здания, рельефа местности и микроклимата (рис. 1). Таким образом, необходимо искать косвенные методы коррекции данных на эффект снега.

Один из них [Коротков и др., 2011] базируется на сравнении вариаций v_i^{cor} , регистрируемых на анализируемой станции (после введения поправки на снег), с вариациями v_i^S на расположенной в непосредственной близости бесснежной (опорной) станции, как, например, показано на рис. 2. Тогда

$$v_i^{cor} \cong v_i^S. \tag{3}$$

Это не идеальное решение, поскольку анализируемый детектор, окруженный снегом, имеет несколько иные функции связи, чем опорный детектор, но, как показало практическое применение, этот метод является достаточно хорошим приближением. Исходя из определения вариаций, соотношение (3) можно записать как

$$\frac{N_i^{cor}}{N_B^{cor}} - 1 = \frac{N_i^S}{N_B^S} - 1, \tag{4}$$

где N_B^{cor} – скорость счета анализируемого детектора, исправленная на влияние снега и N_B^S – скорость счета опорного детектора, свободного от снега, в базовый период. Переходя к измеряемой скорости счета N_i анализируемого детектора в соответствии с (1), получим

$$\frac{N_i/\epsilon_i}{N_B^{cor}} - 1 = \frac{N_i^S}{N_B^S} - 1 \tag{5}$$

или

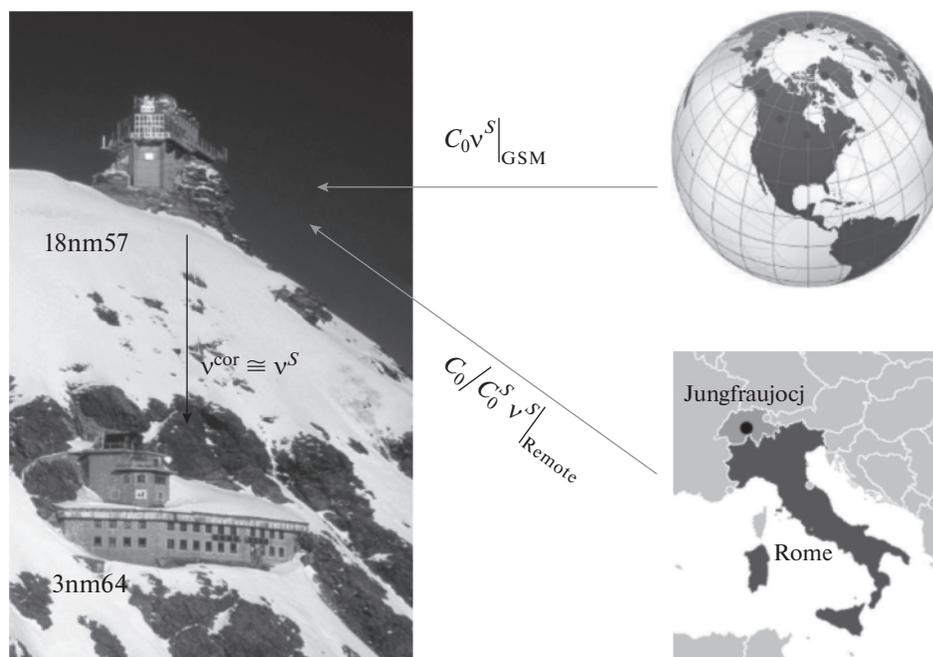


Рис. 2. Анализируемый детектор (3NM64) и различные варианты опорного детектора (18NM57, Rome и результат GSM-анализа). Иллюстрация приближений оценки вариаций космических лучей опорного детектора \bar{v}^S : по данным близлежащего детектора, удаленного детектора или в результате GSM-моделирования.

$$(v_i + 1)/\varepsilon_i - 1 = v_i^S. \quad (6)$$

Окончательно для эффективности анализируемого детектора через наблюдаемые вариации на анализируемом и опорном детекторах получим

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{v} + 1}{\bar{v}^S + 1}. \quad (7)$$

Чтобы исключить суточные вариации, эффективность анализируемого детектора в выражении (7) следует усреднить по кратному суткам интервалу. В данной работе для этой цели мы использовали фильтр простого скользящего среднего с длиной $n = 23$ [Васильев и др., 2007]. В случае применения односторонних фильтров [Вадутов, 2022] данная методика может быть реализована в режиме реального времени.

В качестве опорного детектора можно привлечь данные практически идентичного расположенного рядом детектора, как, например, на станции Jungfraujoch, где действуют два нейтронных монитора – анализируемый Jungfraujoch_3NM64 и опорный Jungfraujoch_18NM57; последний расположен на пике горы и практически не подвержен влиянию снега (рис. 2). Это является идеальным случаем, поскольку гарантирует одинаковые вариации для двух детекторов. Но это единственный случай, такой удачной пары детекторов больше не существует.

В общем случае приходится привлекать не близко расположенные, а удаленные детекторы,

на которых гарантированно отсутствует снежный покров, например, Rome, Mexico, Athens (<https://www.nmdb.eu/nest>). В этом случае необходимо учесть их различия, привлекая приемные коэффициенты этих детекторов [Kobelev et al., 2013].

Действительно, вариации в приближении нулевой гармоники через приемный коэффициент можно записать как:

– для вариаций в пункте расположения анализируемого детектора (рис. 2) $\bar{v}^S = C_0 a_{10}$ и

– для вариаций удаленного опорного детектора (Rome, например, рис. 2) $\bar{v}^S|_{\text{Remote}} = C_0^S a_{10}$, где

C_0 и C_0^S – приемные коэффициенты нулевой гармоники анализируемого и опорного детектора, а a_{10} амплитуда нулевой гармоники для частиц жесткостью 10 ГВ. Исключая амплитуду нулевой гармоники, получим выражение

$$\bar{v}^S = \frac{C_0}{C_0^S} \bar{v}^S|_{\text{Remote}}. \quad (8)$$

Вариант, который представлен в данной работе, базируется на оценке ожидаемых вариаций в пункте расположения анализируемого детектора \bar{v}^S на основе GSM-модели вариаций по данным мировой сети. GSM-анализ, в общем случае, представляет собой усложненный вариант сферического анализа, учитывающий атмосферу и магнитосферу Земли. В результате такой обработ-

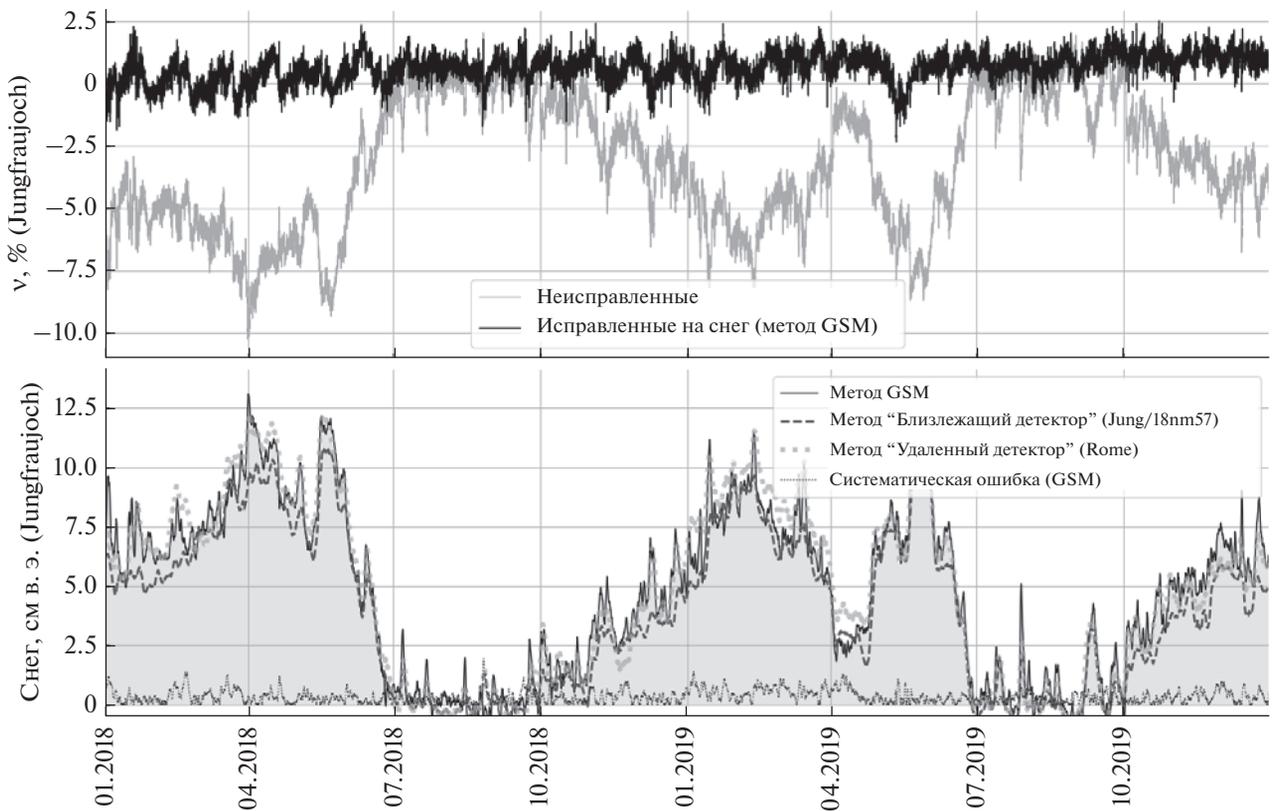


Рис. 3. Вариации скорости счета до и после внесения поправки на снег (верхняя панель) и эффективная толщина снежного покрова (нижняя панель) для нейтронного детектора Jungfraujoch_3NM64. В качестве опорного детектора на нижней панели: квадраты – Rome, штриховая кривая – Jungfraujoch12NM_57, сплошная кривая – результат GSM-анализа, пунктирная кривая – суммарная ошибка метода GSM.

ки получаем вариации космических лучей за пределами магнитосферы v_{GSM} . Ожидаемые изотропные вариации, измеряемые анализируемым детектором с приемным коэффициентом C_0 , равны

$$\bar{v}^S = C_0 \bar{v}_{GSM}, \quad (9)$$

где в случае изотропной задачи, когда $v_{GSM} = v_{10}$. Такой подход является универсальным, хотя и трудоемким.

Основными требованиями к данным опорной станции являются ее стабильность, статистическая точность данных и отсутствие их пропусков, что в случае отдельного опорного детектора выполняется далеко не всегда. При GSM-подходе стабильность всегда выше, поскольку привлекается сеть из 40–50 детекторов, при анализе которых по определенному алгоритму отбраковываются детекторы с некорректными данными. Статистическая точность вариаций одиночного детектора при часовом разрешении $\sim 0.15\%$, а в случае GSM-анализа она возрастает в 5–7 раз. Также значительным преимуществом является полное отсутствие пропусков данных GSM-анализа, поскольку избыточность детекторов доста-

точно для решения системы уравнений при отсутствии данных некоторых из них.

Исправление вариаций данных анализируемого детектора на влияние снежного покрова следует проводить с помощью выражения (1), в котором участвует эффективность, получаемая из уравнения (7).

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе проведен анализ влияния снега более чем для десятка горных и наземных средне- и высокоширотных детекторов космических лучей. Максимальный эффект снега наблюдается на горных станциях. На верхней панели рис. 3 приведены вариации данных изменений горного анализируемого детектора Jungfraujoch_3NM64 в исходном виде и после исправления на влияние снежного покрова с привлечением результатов GSM-анализа. На нижней панели приведено сравнение эффективной толщины снежного покрова для трех рассматриваемых вариантов исправления: на данные близлежащего детектора Jungfraujoch_18NM57, на данные удаленного детектора (в данном случае Rome) и на результат

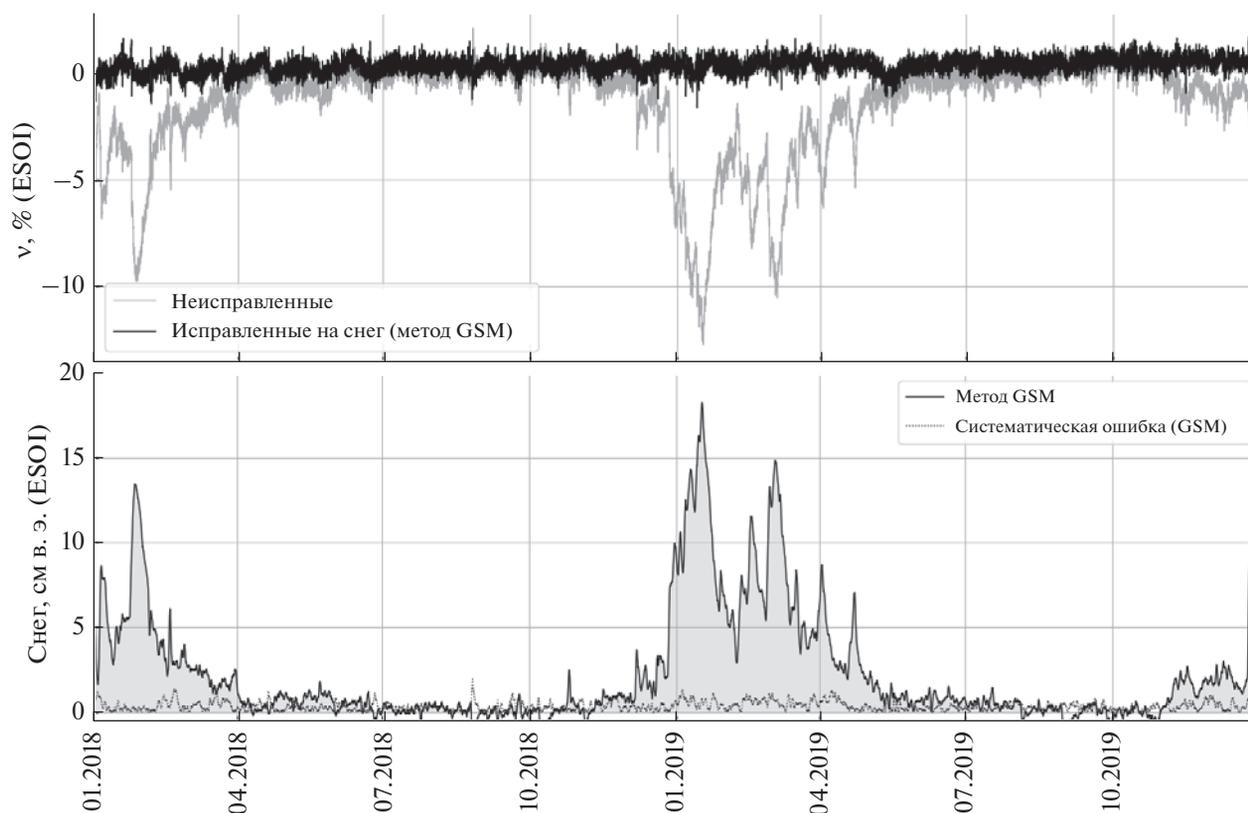


Рис. 4. Вариации скорости счета до и после исправления на снег (верхняя панель) и эффективная толщина снежного покрова (нижняя панель) для нейтронного детектора ESOI.

GSM-анализа. В нижней части панели пунктирной кривой показана систематическая ошибка метода, определенная как “толщина снежного покрова” на заведомо бесснежной станции (в данном случае Rome). Систематическая ошибка обусловлена ошибкой самого метода и долговременной нестабильностью детектора, которая интерпретируется как снег. Как видно из рис. 2 (слева), верхний опорный детектор Jungfrau_joch_18NM57, подвержен эффекту снега в значительно меньшей степени, чем нижний детектор. Тем не менее, максимальная эффективная толщина снега на нем может достигать 2 см в. э., что приводит к систематической ошибке порядка 1% при его использовании в качестве опорного. Таким образом, выбор Jungfrau_joch_12NM57 в качестве опорного детектора является нецелесообразным. В случае удаленного опорного детектора (в нашем случае Rome), всегда остается проблема пропуска данных на интервал, превышающий период сглаживания. Можно заметить, что эффект снега на ст. Jungfrau_joch не наблюдается только в течение нескольких летних месяцев, хотя снег присутствует на окружающих вершинах.

Схожего порядка результат мы получили для станции ESOI (Emilio Segre’ Observatory of Israel-Italy) (рис. 4), где эффективная толщина снежно-

го покрова достигает 15 см в. э. Эффект обусловлен снегом на поверхности клетки Фарадея (рис. 1, слева) и снегом, окружающим детектор. Можно предположить, что зубцы на средней панели рис. 2 связаны с периодическим нарастанием и таянием снега на поверхности клетки Фарадея, а также с тем, что 1/3 эффекта обусловлена снегом, окружающим станцию. В целом же большую часть года снег на станции ESOI отсутствует.

Из длинного ряда среднеширотных станций (Новосибирск, Магадан, Иркутск, Peawanuck, Nain) подробно рассмотрим только ст. Москва (рис. 5). Нейтронный монитор находится внутри здания с шатровой крышей (рис. 1, справа), и эффективная толщина снега в зимний период достигает 1–2 см в. э. При этом наблюдается одинаковый вклад от каждой из 4 секций, что свидетельствует о сборе нейтронов с достаточно большой площади окружающего детектор пространства. Следует напомнить, что систематическая ошибка (~0.5 см в. э.) сравнима с наблюдаемой на среднеширотных станциях толщиной снега.

Высокоширотные станции космических лучей можно разделить на две группы. Станции первой группы с точки зрения эффекта снега близки к среднеширотным детекторам. Эффективная тол-

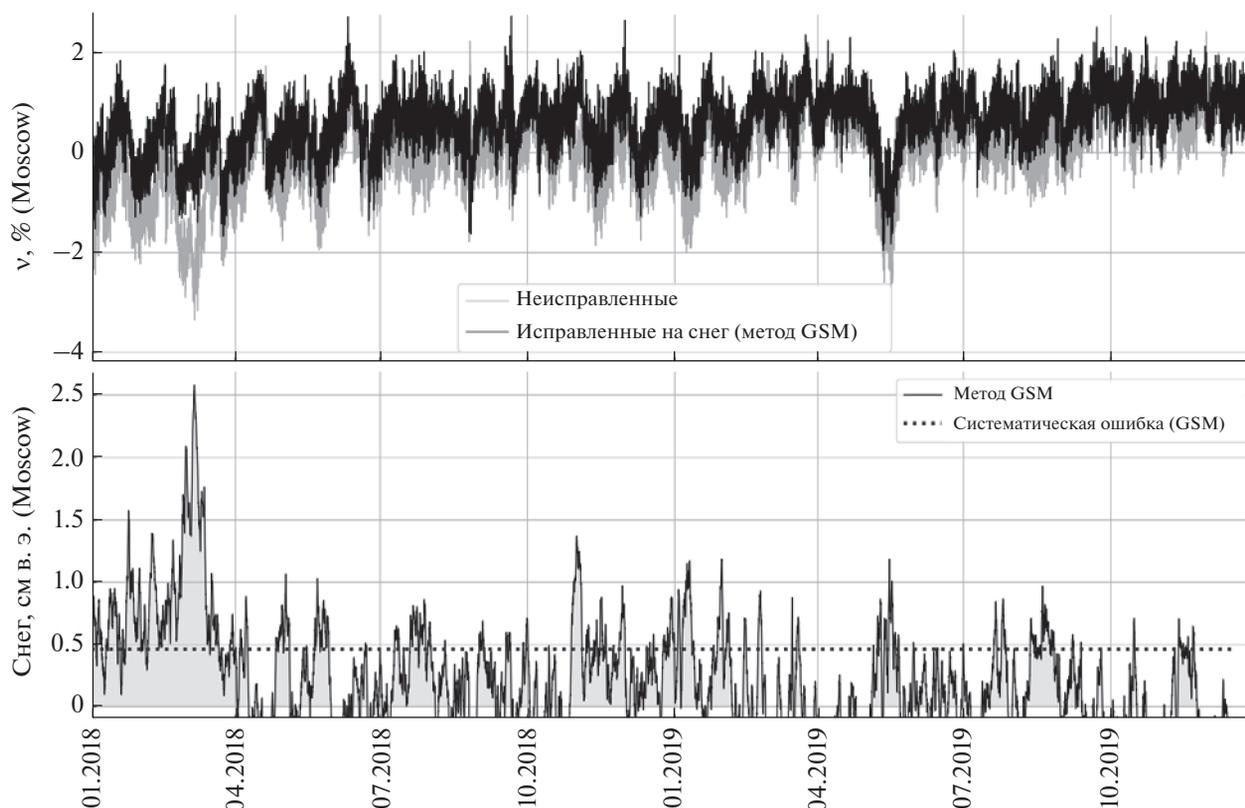


Рис. 5. Вариации скорости счета до и после исправления на снег (верхняя панель) и эффективная толщина снежного покрова (нижняя панель) для нейтронного детектора на ст. Москва.

щина накапливаемого снега для таких станций 2–3 см в. э., поскольку они расположены в полярных широтах с высокой влажностью воздуха. К этой группе, ввиду особых условий, также примыкают антарктические станции: Мирный, Terre Adelie, Mawson, Jang Bogo, Sanae. Высокоширотные станции второй группы находятся в зоне с достаточно низкой влажностью, где сухой снег слабо накапливается на крыше и вблизи детектора. К ним можно отнести Норильск, Тикси, Мыс Шмидта и Inuvik. На этих станциях эффект снега мал и эффективная толщина имеет величину, близкую к ошибке метода (порядка 0.5 см в. э).

4. ВЫВОДЫ

1. Привлечение результатов GSM-анализа, т.е. всей мировой сети станций космических лучей, позволило достичь большей стабильности, и, по крайней мере, пятикратного повышения статистической точности, а также полной непрерывности опорного ряда данных, что обеспечивает новизну и уникальность работы. Результаты могут быть использованы при верификации данных сети нейтронных мониторов или для оценки эффективной толщины снежного покрова на площади вокруг детектора, определяемой дли-

ной пробега нейтрона. Достижимая точность $\pm 0.2(\text{stat}) \pm 0.5(\text{sys})$ см в. э. В перспективе планируется учесть веса для фильтров скользящего среднего и расширить методику введением одно-средних фильтров для применения в режиме реального времени.

2. Исследовано влияние снежного покрова над и вблизи детекторов мировой сети на результат их мониторинга. Снег влияет на показания всех горных, среднеширотных и высокоширотных детекторов, находящиеся в зонах высокой влажности. Эффект снега пренебрежимо мал для детекторов, находящихся внутри континентов в зонах низкой влажности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “Российская сеть станций космических лучей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Вадутов О.С. Математические основы обработки сигналов. Курс лекций, Томск, 2022. <https://portal.tpu.ru/SHARED/v/VOS/study/disc1/Tab>

- *Васильев В.П., Муро Э.Л., Смольский С.М.* Основы теории и расчета цифровых фильтров. Ред. Смольский С.М. М.: ИЦ “Академия”, 272 с. 2007.
- *Коротков В.К., Беркова М.Д., Белов А.В., Кобелев П.Г., Eroshenko E.A., Yanke V.G.* Эффект снега в вариациях космических лучей и методы его учета // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 51. № 2. С. 250–256. 2011.
- *Крымский Г.Ф., Алтухов А.М., Кузьмин А.И. и др.* Распределение космических лучей и приемные векторы детекторов // Геомagnetизм и аэрономия. Т. 6. № 6. С. 991–996. 1966.
- *Belov A.V., Dorman L.I., Yanke V.G.* The simplest versions of the global-spectrographical method / Proc. 18th ICRC. Bangalore, India, 22 August–3 September 1983. Bangalore, India V. 10. P. 144–147. 1983.
- *Belov A.V., Eroshenko E. A., Yanke V.G., Oleneva V.A., Abunina M.A., Abunin A.A.* Global survey method for the world network of neutron monitors // Geomagn. Aeron. V. 58. I. 3. P. 356–372. 2018.
<https://doi.org/10.1134/S0016793218030039>
- *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, Hungary, August 25–September 4 1969. Budapest, Hungary V. 2. Acta Physica, Supplement to V. 29. P. 627. 1969.
- *Dorman L., Pustil'nik L., Sternlieb A., Zukerman I.* Using ground-level cosmic ray observations for automatically generating predictions of hazardous energetic particle levels // Adv. Space Res. V. 31. P. 847–852. 2003.
- *Kobelev P., Belov A., Eroshenko E., Yanke V.* Reception coefficients and energy characteristics of the ground level cosmic ray detectors / Proc. 33rd ICRC. July 2–9, 2013. Rio de Janeiro, Brazil, <http://www.cbpf.br/~icrc2013/papers/icrc2013-0878.pdf>.
- *Kobelev P.G., Trefilova L.A., Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G.* Reference stations method usage for excluding snow effect by 2018-2019 data // Proc. XLIII Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”, Apatity. P. 52–55. 2020.
<https://doi.org/10.37614/2588-0039.2020.43.012>
- *Korotkov V., Berkova M., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Pyle R.* Procedure to emend neutron monitor data that are affected by snow accumulations on and around the detector housing // J. Geophys. Res. –Space. V. 118. P. 6852–6857. 2013.
<https://doi.org/10.1002/2013JA018647>
- *Nagashima K.* Three-dimensional cosmic ray anisotropy in interplanetary space // Rep. Ionos. Space Res. V. 25. № 3. P. 189–211. 1971.