

УДК 53.05

Исследование малых вариаций потока мюонов космических лучей в атмосфере

© 2025 г. С. С. Тимаков, А. А. Петрухин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия

В статье рассматривается способ анализа данных детекторов мюонов космических лучей, позволяющий выявлять незначительные вариации потока, неразличимые в интегральных рядах скорости счета мюонов. Приводится полный математический аппарат способа. Он требует, чтобы детектор мог различать мюоны по азимутальным углам прилета, а для максимальной эффективности – состоял из нескольких независимых детекторов со схожими характеристиками. Ключевой особенностью нового способа является то, что наряду с амплитудой сигнала, отражающего вариации в потоке мюонов, рассматривается направление этого сигнала, которое можно сопоставлять с пространственными характеристиками источников изменения потока мюонов – различных атмосферных явлений. Каждый этап нового способа рассматривается на примере приближения теплого фронта к Москве, а также демонстрируется на примере атмосферного явления, сопровождаемого линией облаков. Дополнительно в работе приведена визуализация данных для нового способа, позволяющая сводить большой объем данных к одной диаграмме, которую можно наносить на спутниковые изображения, и на месте сопоставлять наблюдаемые вариации мюонов с атмосферными явлениями.

Ключевые слова: мюоны, обработка данных, вариации потока мюонов, космические лучи, атмосферные явления.

1. Введение

Мюоны рождаются в результате распадов вторичных частиц, образующихся при взаимодействии первичного космического излучения с атмосферой Земли на глубине примерно 100 г/см^2 , которая соответствует высотам около 15 км, называемым слоем генерации мюонов. Ионизационные потери мюона в атмосфере составляют около $2 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{г}$, а средняя энергия околоразрывных мюонов у поверхности Земли – 4 ГэВ. Поток мюонов, регистрируемый в наземных детекторах, зависит главным образом от количества преодолеваемого вещества и расстояния до точки генерации. Благодаря тому, что мюоны проходят практически через всю атмосферу Земли, они могут использоваться для ее непрерывного мониторинга.

Большинство работ по изучению влияния атмосферы на поток мюонов ограничивается его зависимостью от основных характеристик атмосферы в точке наблюдения, таких как температура и давление. Изучение влияния локальных атмосферных явлений (отдельные облака, внутренние гравитационные волны и др.) затруднено сразу несколькими факторами. Во-первых, для таких исследований детектор должен регистрировать достаточное количество мюонов, чтобы обеспечить необходимую статистику для изучения явлений, наблюдение которых возможно только в диапазоне времени от десятков минут до двух-трех часов. Во-вторых, детектор мюонов должен располагаться на поверхности Земли, а не под землей. Подземные детекторы мюонов полезны при изучении процессов в атмосфере, происходящих на высоте слоя генерации мюонов, поскольку они регистрируют мюоны более высоких энергий, чем схожие по характеристикам детекторы на поверхности Земли, но частицы таких энергий менее чувствительны к любым атмосферным изменениям на пути от точки генерации до регистрирующей установки.

✉ С.С. Тимаков: SSTimakov@mephi.ru
А.А. Петрухин: AAPetrukhin@mephi.ru

Поступила в редакцию: 02.06.2025
После доработки: 10.06.2025
Принята к публикации: 10.06.2025

На сегодняшний день среди исследований локальных атмосферных явлений можно выделить изучение вариаций, обусловленных грозами [1]. Электрические поля в грозовых облаках оказывают достаточно сильное влияние на поток мюонов, чтобы можно было наблюдать вызванные ими изменения на большинстве детекторов мюонов.

Данная статья посвящена принципиально новому способу анализа данных мюонных детекторов, благодаря которому можно обнаруживать незначительные изменения в потоке мюонов, вызванные локальными атмосферными явлениями. Для реализации этого способа необходим детектор, способный различать потоки мюонов с различных азимутальных направлений. Таким детектором является мюонный годоскоп (далее – МГ) УРАГАН [2]. Он непрерывно регистрирует около 4500 мюонов в секунду на трех супермодулях (1500 на супермодуль) и способен восстанавливать их траектории с точностью в 1° по зенитному и азимутальному углам. По его данным можно не только обнаруживать вариации, но и устанавливать направления, в которых наблюдался недостаток или избыток мюонов. Это иллюстрируется на специальных мюонограммах, демонстрирующих отклонение потока частиц от среднего значения в различных направлениях [1].

Мюонограммы удобны при анализе анизотропии потока мюонов и применяются при исследовании атмосферных явлений [3–5], но их сложно сопоставлять с атмосферными источниками локальных возмущений из-за низкой статистики потока мюонов с отдельных направлений и зенитной неоднородности потока. Для обоснованных выводов о влиянии локальных явлений на вариации потока мюонов необходим большой набор данных о реакции потока на явления одного типа, что сложно реализовать в условиях динамической атмосферы, в которой каждое событие является практически уникальным. Требуется создание нового метода, который бы позволял в условиях низкой статистики обнаруживать слабые изменения потока мюонов, вызванных локальными атмосферными явлениями. Рассмотрим такой метод на примере МГ УРАГАН.

2. Метод азимутального сканирования

Каждую минуту МГ УРАГАН, состоящий из трех независимых супермодулей (СМ 8, СМ 10, СМ 11), сохраняет информацию о зарегистрированных мюонах в матрице зенитно-азимутальных углов $M_{\theta\varphi}$, которая имеет размеры 90×90 ячеек [6]. Каждый элемент матрицы соответствует числу мюонов с конкретных зенитного θ (с шагом в 1°) и азимутального φ (с шагом в 4°) углов, зарегистрированных в течение живого времени $0 \leq \tau < 60$ с. Таким образом, для каждого целочисленного промежутка времени T мин имеется набор из T матриц, который можно описать в виде тензора $M_{\theta\varphi t}$. При делении элементов каждой матрицы $M_{\theta\varphi}$ этого тензора на соответствующее им живое время t получается тензор скорости счета мюонов $C_{\theta\varphi t}$, каждый элемент которого соответствует скорости счета мюонов с конкретных зенитного θ и азимутального φ углов для момента времени t .

Тензоры могут быть использованы для вычисления временного ряда скорости счета мюонов со всех зенитных углов для определенного азимутального направления φ :

$$S_\varphi(t) = \sum_\theta C_{\theta\varphi t}. \quad (1)$$

Временной шаг может быть выбран любым (но кратным 1 мин) путем сложения между собой минутных матриц. Используется полярная система координат: φ – азимутальный угол (0° – направление на север), θ – зенитный угол (0° – по направлению к зениту).

Допустим, что какое-то явление оказывает влияние на атмосферу, вызывая в ней колебания с некоторым периодом, которые можно представить как поперечные волны, распространяющиеся от источника возмущения. Такие волны могут смещать слой генерации мюонов, что должно отразиться на потоке мюонов. Рассмотрим случай, когда такая волна проходит над детектором. Если отобрать мюоны в плоскости, которая перпендикулярна рабочим плоскостям МГ УРАГАН, а вектор нормали этой плоскости будет сонаправлен с волновым вектором волны, то все отобранные мюоны будут приходить с одной фазы возмущенной области слоя генерации. В таком ряде скорости счета, построенном на основе отобранных мюонов, вызванные волной вариации потока мюонов обнаружить легче всего. Это не значит, что они будут отчетливо видны, поскольку существует много других факторов, влияющих

на вариацию потока мюонов. Однако при любом другом способе отбора мюонов эффект будет менее заметным, поскольку они будут отбираться с разных фаз волны, что может компенсировать вариации: уменьшение потока из той части атмосферы, где слой генерации приподнят, будет конкурировать с увеличением потока из той части, где он опущен.

Введем понятие сканирующей плоскости по следующим критериям: вектор нормали такой плоскости перпендикулярен вектору, направленному от установки к зениту, а сама плоскость проходит через геометрический центр детектора. Допустимо пренебречь геометрическими размерами детектора и рассматривать его как точку. Тогда два вышеприведенных условия можно преобразовать в одно: плоскость проходит через детектор и точку зенита для этого детектора. Этим условиям удовлетворяет целое семейство плоскостей, отличающихся лишь значениями азимутальной компоненты φ их нормалей.

Чтобы провести отбор мюонов в сканирующей плоскости с азимутальным углом вектора нормали φ_0 , необходимо отобрать все мюоны, траектории которых принадлежат семейству сканирующих плоскостей с азимутальными углами вектора нормали в диапазоне

$$\varphi_0 \leq \varphi < \varphi_0 + 4^\circ. \quad (2)$$

Далее вместо выражения «сканирующая плоскость, вектор нормали которой имеет азимутальный угол φ » будет использоваться обозначение P_φ . Когда рассматриваются траектории мюонов, лежащие в сканирующей плоскости, имеются в виду все траектории мюонов, принадлежащих зазору – всему семейству сканирующих плоскостей, описываемых формулой (2). Для увеличения статистики зазор можно дополнительно расширить, тогда семейство плоскостей будет описываться формулой

$$\varphi_0 - \Delta\varphi \leq \varphi < \varphi_0 + \Delta\varphi + 4^\circ, \quad (3)$$

где $\Delta\varphi$ – искусственно введенный зазор. Отметим особенность сканирующих плоскостей: $P_\varphi \equiv P_{\varphi+180^\circ}$, а, значит, любые результаты, полученные для потока мюонов в плоскости P_φ , будут повторяться в $P_{\varphi+180^\circ}$.

Основной алгоритм метода выглядит таким образом:

1. Для рассматриваемого интервала времени (t_1, t_2) создаются временные ряды скорости счета в сканирующих плоскостях: $S_0(t), S_1(t), \dots, S_{179}(t)$ по формуле (1).

2. Каждый из полученных рядов подвергается анализу с помощью комплексного вейвлета Морли в диапазоне периодов (T_1, T_2) с шагом ΔT мин, и получается матрица комплексных коэффициентов, для которых вычисляются их модули.

3. Проводится анализ матриц коэффициентов мощностей вейвлет-разложения, описанный далее.

Результат анализа для выбранного φ представлен на рис. 1: на нем представлен ряд дифференциальной интенсивности (сверху) и матрица мощностей коэффициентов вейвлет-разложения W_{T_i} (снизу), где каждый элемент соответствует значению мощности для рассматриваемого периода T и момента

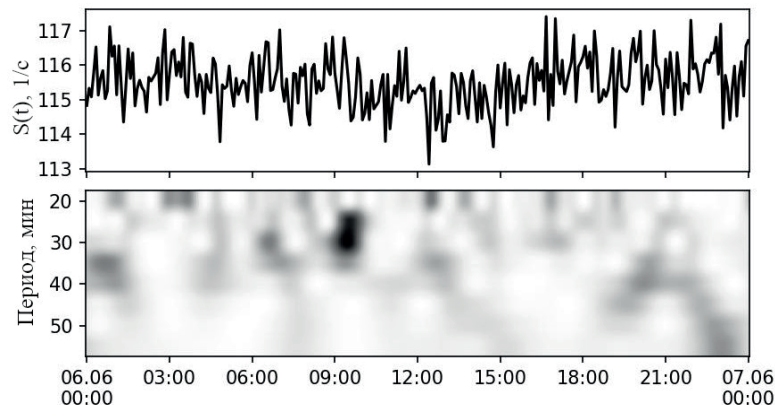


Рис. 1. Пример вейвлета для ряда в сканирующей плоскости, полученный для даты 06.06.2021: сверху – ряд $S_\varphi(t)$; снизу – матрица мощностей коэффициентов вейвлет-разложения; более темные области соответствуют высоким относительным значениям коэффициентов

времени t . Все вейвлеты можно объединить в один тензор $W_{T_{\varphi t}}$, где индекс φ отвечает за положение сканирующей плоскости и соответствует ее азимутальному направлению нормали. Описанный алгоритм доступен для любого детектора, способного различать отдельные траектории мюонов хотя бы по азимутальным углам. Возможная конструкция детектора описана в патенте, посвященном этому способу анализа данных [7]. Подробное описание каждого шага можно найти в ранее опубликованной статье, посвященной этому методу [8].

3. Сопоставление данных МГ УРАГАН с метеонаблюдениями

Один из способов оценки влияния атмосферных явлений на вариации потока мюонов – сопоставление с актуальной метеорологической обстановкой в зоне наблюдения с помощью данных метеорологических радаров или спутников. Такие данные чаще всего представляют собой набор изображений для разных моментов времени, которые неудобно сопоставлять с результатами вейвлет-анализа. Для решения этой проблемы применяется особая фильтрация, которая одновременно уменьшает количество обрабатываемой информации и подготавливает ее к визуальному анализу:

Весь диапазон периодов вейвлетов (T_1, T_2) вручную разбивается на поддиапазоны вида $\tau_k = (\tau_k, \tau_{k+1})$, $1 \leq k \leq L$, где L – число поддиапазонов.

Для каждого из поддиапазонов ищется максимальное значение мощности коэффициентов вейвлет-разложения:

$$R_{\tau_{\varphi t}} = \left(\max_{\tau_k \leq T < \tau_{k+1}} W_{T_{\varphi t}} \right) \Big|_{1 \leq k \leq L}. \quad (4)$$

Полученные значения тензора $R_{\tau_{\varphi t}}$, которые будут называться откликами, необходимо перемасштабировать от 0 до 1:

$$F_{\tau_{\varphi t}} = (R_{\tau_{\varphi t}} - R_{\min}) / (R_{\max} - R_{\min}), \quad (5)$$

где $R_{\min}$ и $R_{\max}$ – соответственно, минимальное и максимальное значение тензора.

Для каждого момента времени t отклик $F_{\tau_{\varphi t}}$ можно нанести на круговую диаграмму. Направление отрезка от окружности к центру в этой диаграмме соответствует азимутальному направлению вектора нормали сканирующей плоскости, а величина отрезка пропорциональна мощности коэффициентов вейвлет-разложения.

Отклики могут быть нанесены на любое изображение, например, на спутниковые изображения *Meteosat*¹, в которых наблюдается наступление атмосферного фронта 02.05.2021 (рис. 2). Со 2 по 3 мая с юга к Москве подходит теплый фронт. Он был крупным, четко различимым и единственным в области наблюдения, что обеспечило наиболее чистые условия для тестирования метода.

Для всего рассматриваемого промежутка времени были вычислены отклики для каждого супермодуля МГ УРАГАН. Диапазон периодов был выбран от 1 до 3 ч. При приближении теплого фронта на всех супермодулях наблюдаются отклики, направленные вдоль его вектора движения – в направлении юг-север (рис. 3, верхний ряд). Величина коэффициентов на откликах представлена длиной отрезка, от окружности к центру.

Несмотря на общее согласие в откликах супермодулей (примерно одно направление и время), между ними имеются различия – углы откликов немного варьируются, а их времена возникновения могут не сходиться с разницей в несколько часов. Если предполагается, что отклики вызваны одним физическим явлением, то ожидаемое проявление вариаций мюонов должно быть одинаковым на всех супермодулях, так как расстояние между ними (несколько метров) несоизмеримо меньше характерных размеров атмосферных явлений. Расхождения могут быть вызваны случайными флуктуациями, которые являются независимыми для каждого модуля. Если амплитуда флуктуаций сопоставима с амплитудой искомых

¹ Архив спутников *Meteosat* [Электронный ресурс]. URL: <https://weather.us/satellite/russia-west/top-alert-15min/20210502-0245z.html> (дата обращения: 28.06.2024).

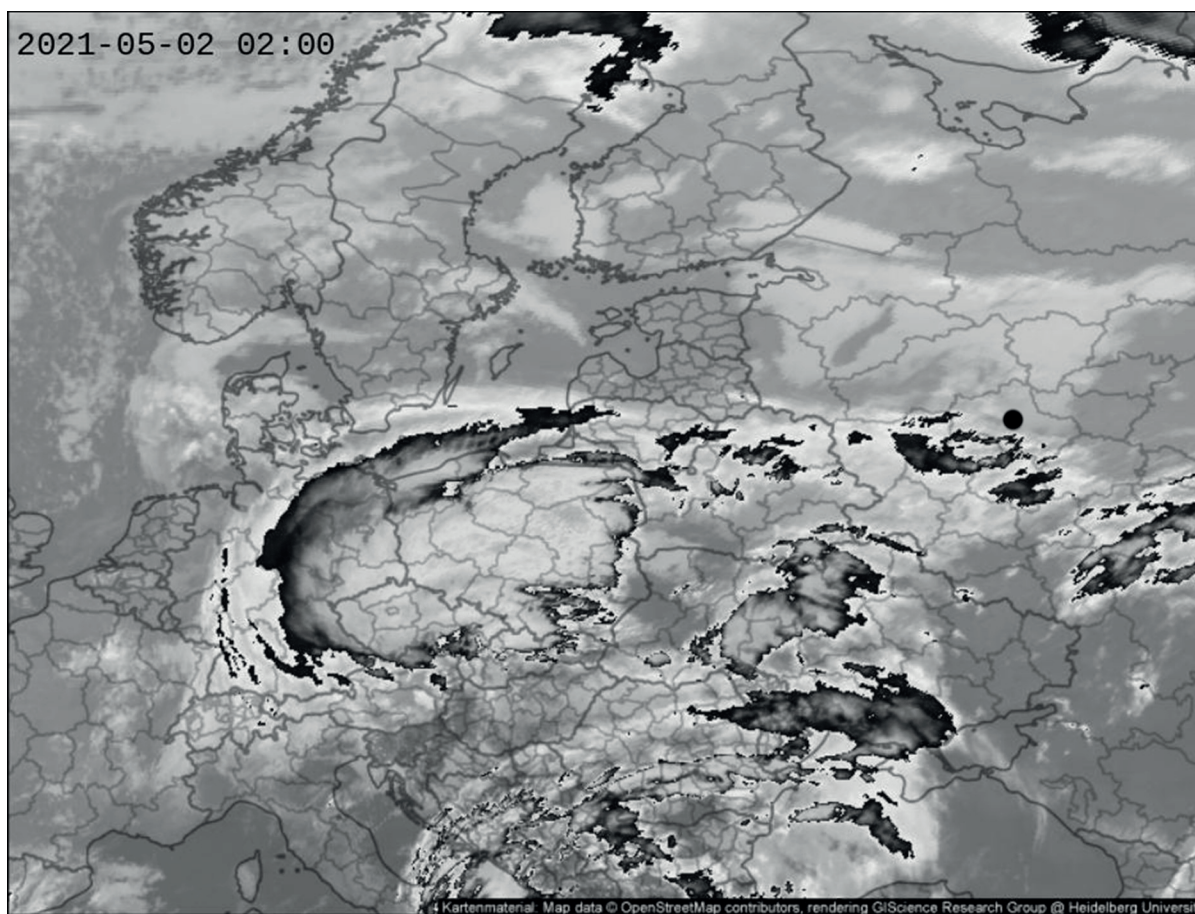


Рис. 2. Спутниковое изображение, на котором видно приближение теплого фронта к Москве с юга. Положение Москвы отмечено точкой справа посередине

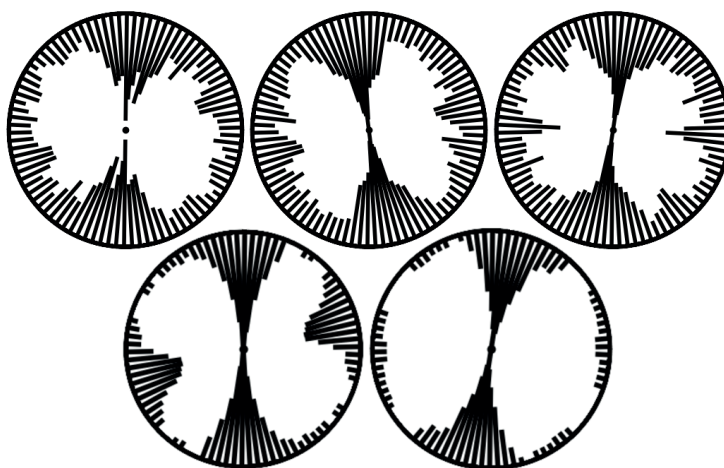


Рис. 3. Отклики при приближении теплого фронта к Москве 02.05.2021, 02:00. Сверху, слева направо: отклики для CM 08, CM 10, CM 11. Снизу, слева направо: отклики $*D_{\text{эф}}$ с дополнительными окнами и обрезкой 25 %, отклики $A_{\text{эф}}$ для сканирующих полуплоскостей

вариаций, то флуктуации могут оказывать на них сильное влияние, которое в контексте откликов будет проявляться в виде смещений по углу и времени.

4. Способы повышения эффективности метода

Одним из способов исправить эту ситуацию является увеличение статистики путем сложения скоростей счета N разных супермодулей:

$$M_{\theta\varphi t}^{all} = \sum_{i=1}^N M_{\theta\varphi t}^i. \quad (6)$$

Однако этот способ будет плохо работать в том случае, если амплитуда флуктуаций сопоставима с амплитудой вариаций, поскольку невозможно разделять полезные сигналы и шумовые.

Допустим, что полезные сигналы хоть в какой-то степени проявляются на каждом супермодуле, тогда как шумовые нет: предполагаем, что флуктуации могут заглушить амплитуду, сместить во времени или по углу, но не погасить полностью. В соответствии с этим допущением дополним алгоритм сопоставлением между собой разных супермодулей:

$$D_{\tau\varphi t} = \min_{1 \leq i < N} F_{\tau\varphi t}^i. \quad (7)$$

Индекс i проходит через все супермодули, от которых был получен отклик. В результате такого сопоставления получается матрица откликов $D_{\tau\varphi t}$, которые являются минимальными значениями откликов для каждого угла, момента времени и поддиапазона периодов среди всех супермодулей. Можно сделать правила создания откликов $D_{\tau\varphi t}$ менее строгими, если сравнивать не конкретные величины тензоров откликов $F_{\tau\varphi t}$, а суммы элементов в некоторых окнах по углу $\Delta\phi$ и по времени Δt . Для этого вычислим соответствующие суммы для каждого супермодуля:

$${}^*F_{\tau\varphi t} = \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \sum_{\phi-\Delta\phi}^{\phi+\Delta\phi} F_{\tau\varphi t}. \quad (8)$$

Подставим получившиеся отклики в формулу (7) и получим оконные отклики ${}^*D_{\tau\varphi t}$. Чтобы избавиться от пьедестала, получившегося в результате суммирования, модернизируем формулу (8) и введем понятие обрезки U – пороговое условие для суммирования. Суммируются только те элементы тензора, которые больше порога:

$${}^*F_{\tau\varphi t} = \sum_{t-\Delta t}^{t+\Delta t} \sum_{\phi-\Delta\phi}^{\phi+\Delta\phi} F_{\tau\varphi t} \Big|_{>U}. \quad (9)$$

Значения откликов $D_{\tau\varphi t}$ принадлежат диапазону от 0 до 1. На рис. 3, слева в нижнем ряду представлены получившиеся отклики ${}^*D_{\tau\varphi t}$ при пороге 0.25.

Таким образом, были выделены полезные сигналы, присутствующие на всех супермодулях, и подавлены шумовые. В данном случае шумовым считается любой сигнал, отсутствующий хотя бы в одном СМ. Обрезка позволяет убрать из сумм по окнам все отклики, которые мы считаем шумовыми по умолчанию (с маленькой амплитудой).

Важно отметить один факт: с каждым новым этапом фильтрации данных мы все больше теряем изначальный физический смысл получаемых значений и делаем их более абстрактными. Если сравнить отклики ${}^*D_{\tau\varphi t}$ с вейвлетами, то не получается ясно обозначить связь между ними, ведь отклики прошли несколько этапов сравнения, суммирования и перемасштабирования. Определим физический смысл откликов ${}^*D_{\tau\varphi t}$ следующим образом: значение элемента тензора ${}^*D_{\tau\varphi t}$ отражает минимальную величину мощности коэффициентов вейвлет-разложения, полученного для всех супермодулей для рассматриваемого момента времени t , диапазона периодов τ и сканирующей плоскости, вектор нормали которой направлен по азимутальному углу ϕ .

Мюоны отбираются в сканирующих плоскостях, и мощность коэффициентов вейвлет-разложения ассоциируется с падением скорости счета мюонов по всем направлениям, лежащим в зазоре сканирующей плоскости. Но если падение произошло только в одной полуплоскости или в некотором узком диапазоне азимутальных и зенитных углов, то такой отбор может привести к неверной интерпретации наблюдаемых откликов. Чтобы понятнее описать эту проблему, представим следующую ситуацию. К северу от точки наблюдения есть что-то, что влияет на поток мюонов. Для сканирующей плоскости P_{90} , нормаль которой направлена на восток, создаются отклики. Часть этой плоскости затрагивает возмущенные направления с севера. На круговой диаграмме наблюдаются отклики в направлении восток-запад, и делается вывод о наличии над точкой наблюдения возмущения, движущегося вдоль направления восток-запад, что неверно.

5. Сканирующие полуплоскости

Для устранения таких ситуаций незначительно изменим метод: ограничим часть сканирующей плоскости прямой, проходящей через геометрический центр детектора и соответствующую центру точку зенита. Для описания направления полученной полуплоскости будем использовать угловую компоненту φ характеризующего вектора, лежащего в этой полуплоскости и ортогонального ограничивающей прямой. Все предыдущие шаги останутся без изменений, с поправкой на то, что суммирование потоков мюонов с отдельных углов будет проводиться лишь для одной половины сканирующей плоскости. Введем еще один этап, заключающийся в сопоставлении противоположных откликов ${}^*D_{\varphi t}$ для каждого момента времени и поддиапазона периодов между собой:

$$A_{\varphi t} = \min \left({}^*D_{\varphi_x t}, {}^*D_{\varphi_y t} \right) \Big|_{\varphi_y = \varphi_x + 180^\circ}. \quad (10)$$

Пример откликов $A_{\varphi t}$ на приближение теплого фронта представлен на рис. 3, справа, в нижнем ряду.

Введем условия возникновения откликов в методе $A_{\varphi t}$:

1. В существующем поле скалярной величины X (например, плотность воздуха) существует изменение (градиент), описываемое изоповерхностью, которую для простоты считаем вертикальной плоскостью. Отклик возникает, когда изоповерхность с вектором нормали φ совпадает со сканирующей плоскостью P_φ .

2. Величина градиента достаточно большая, чтобы оказывать такое влияние на поток мюонов, которое будет заметно в ряде скорости счета, составленном для мюонов, траектории которых лежат в сканирующей плоскости.

Первое условие качественное – при наблюдении отклика $A_{\varphi t}$ предполагается именно такое объяснение его причины. Второе условие количественное и зависит от характеристик детектора. На основе имеющихся данных о направлении ветра фронтальная зона, проходившая через Москву 02.05.2021, начала свое движение над детектором примерно в полночь на 2 мая. Плоскость, разделяющая теплую и холодную массы воздуха в теплом фронте, наклонена под большим углом в сторону движения. В вертикальном профиле атмосферы в точке наблюдения теплая масса воздуха постепенно вытесняет холодную сверху вниз, поэтому для отклика 02.05.2021 г. в 02:00 объяснение реакции мюонов на приближающийся теплый фронт лежит в области высокой тропосферы или нижней стратосферы, где в рассматриваемый момент времени проходит верхняя часть фронтальной зоны. Исходя из этих соображений, в соответствии с ранее введенными условиями, можно сделать вывод, что градиент тесно связан с характеристиками верхней части фронтальной зоны.

Описанный метод позволяет обнаруживать вариации потока мюонов настолько слабой амплитуды, что они не наблюдаются в интегральных рядах. В качестве дополнительного примера приведем событие 01.04.2024 г. – возмущение в атмосфере неизвестной природы, сопровождавшееся линией облаков шириной около 10 км и длиной порядка сотен км (рис. 4). Во время прохождения облаков через Москву не наблюдается резких изменений в давлении или температуре, и единственным способом обнаружения остается визуальный анализ данных метеорологических радаров или спутниковых изображений².

² Архив спутников дистанционного зондирования Sentinel [Электронный ресурс]. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (дата обращения: 28.06.2024).

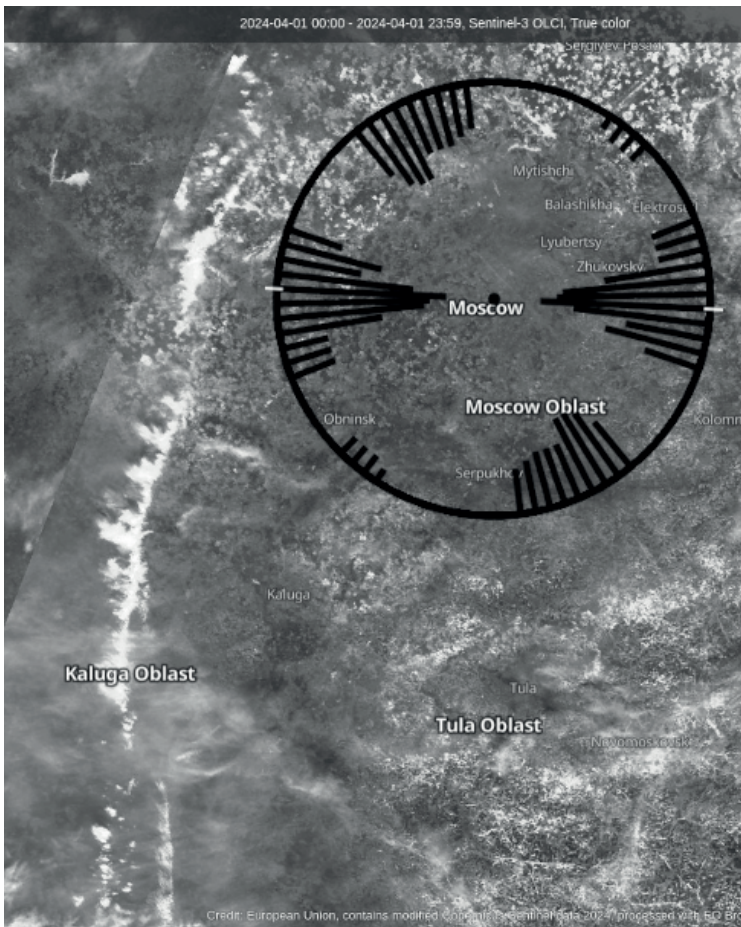


Рис. 4. Спутниковый снимок линии облаков, сделанный 01.04.2024, 07:40 (наиболее близкий ко времени отклика из доступных). На изображение нанесен отклик $A_{\text{тф}}$, сделанный для 11:40, когда линия облаков проходила над Москвой

За основу для анализа были взяты данные сети погодных радаров. До 9:00 01.04.2024 наблюдается линия облаков, которая затем пропадает. В 11:40 наблюдается сильный отклик $A_{\text{тф}}$. Руководствуясь теми соображениями, что на относительно небольших масштабах ход облачных масс можно аппроксимировать линейным уравнением движения, было реконструировано перемещение явления по наблюдаемой его части. В соответствии с реконструкцией, отклик направлен по ходу движения линии облаков (облака идут с запада на восток). Совпадение времени возникновения отклика со временем наблюдения перистых облаков над Москвой может указывать на процессы в верхней тропосфере или нижней стратосфере, которые и вызвали изменение потока мюонов.

График интегральной скорости счета мюонов (рис. 5) не позволяет установить причину отклика мюонов из-за слишком сильных флуктуаций.

Особенность создания откликов $A_{\text{тф}}$ заключается в поиске согласованных (по времени и направлению) сигналов, а амплитуда откликов определяется минимальной амплитудой среди всех

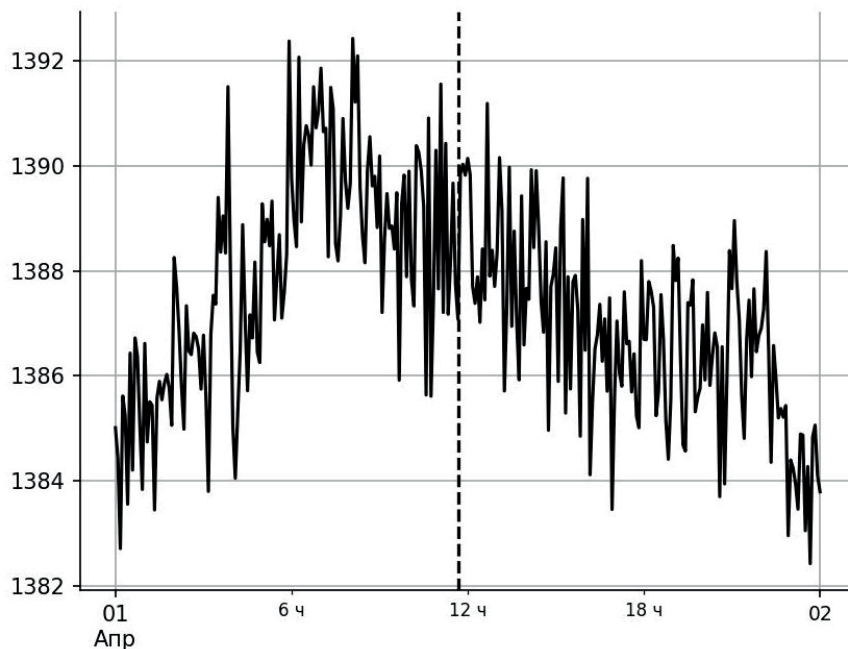


Рис. 5. График интегральной скорости счета детектора УРАГАН (мюонов в секунду) с шагом в 5 мин для 01.04.2024. Пунктирная линия обозначает момент отклика

супермодулей для каждого направления и момента времени. Благодаря этому можно обнаруживать малые вариации, как в приведенном выше примере.

6. Заключение

Разработан метод исследования временных рядов мюонных детекторов, способных различать отдельные азимутальные направления прилета мюонов – метод азимутального сканирования. Для него не требуется массивов предварительно набранных данных, он может использоваться непосредственно на измерениях, получаемых непрерывно во время работы установки. На примерах соответствия откликов с визуально наблюдаемыми атмосферными феноменами были обнаружены малые вариации потока мюонов на атмосферные явления, недоступные для наблюдения при анализе интегральных рядов. Это стало возможным, поскольку в основе метода лежит специальный способ отбора данных и алгоритм сопоставления между собой трех супермодулей МГ УРАГАН. Если детектор состоит из одного детектирующего модуля, то часть описанного алгоритма будет ему недоступна, поскольку требует набора из нескольких модулей.

Важным преимуществом описанного способа анализа данных является получение сразу двух характеристик для сопоставления с атмосферным явлением: амплитуда и направление. Благодаря этому он позволяет обнаруживать очень малые вариации и может использоваться как самостоятельно, так и служить вспомогательным инструментом для выделения промежутков в интегральных рядах темпа счета мюонов, для которых требуется более тщательный анализ.

Благодарности

Работа выполнена на уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект № FSWU-2023-0068 “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей”).»

Финансирование

Авторы заявляют об отсутствии источников финансирования.

Конфликт интересов

Конфликт интересов отсутствует.

Вклад авторов

С.С. Тимаков – разработка математической модели, проведение численных расчетов, анализ экспериментальных данных, выявление закономерностей, подготовка текста статьи.

А.А. Петрухин – формулировка идеи, концепции и цели исследования, постановка задач, участие в анализе полученных данных, обсуждение результатов, редактирование текста статьи.

Список литературы

1. *Barbashina N.S., Petrukhin A.A., Yashin I.I.* Muon Hodoscope URAGAN as a New Meteorological Tool // Proceeding of 6-th International TEPA Symposium, 2021. V. 124. P. 102505.
2. *Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Mannocchi G., Petrukhin A.A., Saavedra O., Timashkov D.A., Trincherro G., Chernov D.V., Shutenko V.V., Yashin I.I.* The URAGAN wide-aperture large-area muon hodoscope // Instruments and Experimental Techniques, 2008. V. 51. № 2. P. 180–186.
3. *Barbashina N.S., Astapov I.I., Belyakova T.A., Dmitrieva A.N., Kozyrev A.V., Pavlyukov Yu.B., Petrukhin A.A., Serebryannik N.I., Shutenko V.V., Yashin I.I.* Muon flux variations detected by the URAGAN muon hodoscope during thunderstorms // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017. V. 81. № 2. P. 230–233.
4. *Качур А.П., Дмитриева А.Н., Ковыляева А.А., Шутенко В.В.* Отклик мюонного годоскопа УРАГАН на грозовые события в Московском регионе // Ученые записки физического факультета Московского Университета, 2018. V. 4. P. 1840404.

5. Kachur A.P., Barbashina N.S., Pavlyukov Yu.B., Petrukhin A.A., Serebryannik N.I., Shutenko V.V. Investigating Thunderstorm Activity in Moscow Region Via Methods of Muonography // *Physics of Atomic Nuclei*, 2021. V. 84. № 6. P. 1098–1104.
6. Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S., Borog V.V., Chernov D.V., Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Mishutina Yu.N., Petrukhin A.A., Shutenko V.V., Yakovleva E.I. Real-time data of muon hodoscope URAGAN // *Advances in Space Research*, 2015. V. 56. № 12. P. 2693–2705.
7. Тимаков С.С. Способ азимутального сканирования атмосферы с использованием потока мюонов космических лучей. Патент РФ. № 2819137. 2024.
8. Timakov S.S., Petrukhin A.A., Epifanov V.R. Investigation of Atmospheric Fronts by Means of Cosmic Ray Muon Flux // *Physics of Atomic Nuclei*, 2023. V. 86. № 6. P. 1114–1118.

Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI», 2025, vol. 14, no. 3, pp. 203–213

Study of small variations in the atmosphere in the cosmic ray muon flux

S. S. Timakov , A. A. Petrukhin 

¹National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, 115409, Russia

 SStimakov@mephi.ru

 AAPetrukhin@mephi.ru

Received June 2, 2025; revised June 10, 2025; accepted June 10, 2025

This paper presents a method for analyzing data from cosmic-ray muon detectors, enabling the detection of subtle flux variations that are indistinguishable in the integral muon count rate. The method requires detectors capable of distinguishing muons by their azimuthal arrival angles and, for optimal performance, multiple independent detectors with similar characteristics. A key feature of the proposed approach is that it considers not only the amplitude of the signal (reflecting muon flux variations) but also its direction, which can be correlated with the spatial characteristics of variation sources, such as atmospheric phenomena. Each step of the method is illustrated using the example of a warm front approaching Moscow, as well as an atmospheric event accompanied by a cloud line. Additionally, the paper presents a data visualization for the new method that allows a large amount of data to be reduced to a single diagram that can be plotted on satellite images and the observed muon variations can be compared with atmospheric phenomena in situ.

Keywords: muons, data processing, muon flux variations, cosmic rays, atmospheric phenomena.

References

1. Barbashina N.S., Petrukhin A.A., Yashin I.I. Muon Hodoscope URAGAN as a New Meteorological Tool. Proceeding of 6-th International TEPA Symposium, 2021. Vol. 124. Pp. 102505.
2. Barbashina N.S., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Mannocchi G., Petrukhin A.A., Saavedra O., Timashkov D.A., Trincherro G., Chernov D.V., Shutenko V.V., Yashin I.I. The URAGAN wide-aperture large-area muon hodoscope. Instruments and Experimental Techniques, 2008. Vol. 51. No. 2. Pp. 180–186.
3. Barbashina N.S., Astapov I.I., Belyakova T.A., Dmitrieva A.N., Kozyrev A.V., Pavlyukov Yu.B., Petrukhin A.A., Serebryannik N.I., Shutenko V.V., Yashin I.I. Muon flux variations detected by the URAGAN muon hodoscope during thunderstorms. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2012. Vol. 81. No. 2. Pp. 230–233.
4. Kachur A.P., Dmitrieva A.N., Kovylyayeva A.A., Shutenko V.V. Otklik muonnogo godoskopa URAGAN na grosovyje sobytija v Moskovskom regione [Response of the muon hodoscope URAGAN to thunderstorm events in the Moscow region]. Uchenye zapiski fizicheskogo fakulteta Moskovskogo Universiteta, 2018. Vol. 4. Pp. 1840404 (in Russian).

5. Kachur A.P., Barbashina N.S., Pavlyukov Yu.B., Petrukhin A.A., Serebryannik N.I., Shutenko V.V. Investigating Thunderstorm Activity in Moscow Region Via Methods of Muonography. *Physics of Atomic Nuclei*, 2021. Vol. 84. No. 6. Pp. 1098–1104.
6. Yashin I.I., Astapov I.I., Barbashina N.S., Borog V.V., Chernov D.V., Dmitrieva A.N., Kokoulin R.P., Kompaniets K.G., Mishutina Yu.N., Petrukhin A.A., Shutenko V.V., Yakovleva E.I. Real-time data of muon hodoscope URAGAN. *Advances in Space Research*, 2015. Vol. 56. No. 12. Pp. 2693–2705.
7. Timakov S.S. Sposob azimutalnogo skanirovaniya atmosfery s ispolzovaniem potoka muonov kosmicheskikh lychei [Method of azimuthal scanning of the atmosphere using the cosmic ray muon flux]. Patent RF. No. 2819137, 2024.
8. Timakov S.S., Petrukhin A.A., Epifanov V.R. Investigation of Atmospheric Fronts by Means of Cosmic Ray Muon Flux. *Physics of Atomic Nuclei*, 2023. Vol. 86. No. 6. Pp. 1114–1118.