

Отклик мюонного годоскопа УРАГАН на грозовые события в Московском регионеА. П. Качур,^{*} А. Н. Дмитриева,[†] А. А. Ковыляева,[‡] В. В. Шутенко[§]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
НОЦ НЕВОД, Россия 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31*

(Статья поступила 14.05.2018; Подписана в печать 03.07.2018)

Поток мюонов, рождённых в атмосфере, чувствителен к изменениям её основных термодинамических параметров вдоль траектории движения частиц. Эта зависимость используется для мюонного мониторинга атмосферы: с её помощью можно проследить динамику таких процессов, как грозы. В настоящей работе поиск грозовых возмущений потока мюонов, регистрируемого мюонным годоскопом (МГ) УРАГАН, был реализован автоматическим методом выделения значительных отклонений текущих значений темпа счёта мюонов (I_{sum}) и проекций относительного вектора анизотропии (r_{south} , r_{east} , r_z) от их скользящего среднего. Были обработаны данные МГ УРАГАН за весенне-летние периоды 2014–2017 годов, в которые наблюдалось 100 грозовых событий. Выбранные таким методом даты сверялись с датами наблюдения гроз по данным трёх метеостанций «ВДНХ», «Домодедово» и «Балчуг», а также с данными метеостанции, расположенной в Экспериментальном комплексе НЕВОД. Анализ полученных данных, проведённый для 36 грозовых событий, показал, что характерными для грозового события являются одиночные выбросы в рассматриваемых параметрах, обычно возникающие несколько раз за период прохождения грозы. Также во время прохождения грозы в характеристиках потока мюонов присутствуют периодические возмущения с периодами в диапазоне от одного до пяти часов.

PACS: 92.60.Wc УДК: 551.515.4.

Ключевые слова: мюонная диагностика атмосферы, гроза, мюоны космических лучей, вариации потока мюонов.

ВВЕДЕНИЕ

На территории Московского региона ежегодно регистрируется порядка 30 гроз. Они представляют высокую опасность как для населения, так и для городской инфраструктуры, часто приводя к разрушительным последствиям. Эти факторы подчёркивают необходимость всестороннего изучения грозовых событий, в том числе и методами мюонной диагностики [1] – направления метеорологических наблюдений, основанного на проникающей способности мюонов космических лучей. Решение этой задачи основано на анализе регистрируемых пространственно-угловых вариаций потока мюонов на поверхности Земли.

В настоящее время в данной области разработаны подходы к анализу метеорологических явлений методами мюонной диагностики для заблаговременной идентификации опасных атмосферных явлений (см. [2]). Данная работа продолжает эти исследования, предлагая автоматическую методику отбора грозовых событий, которая является новой и позволяет выделять метеоявления, имевшие отклик в данных мюонного годоскопа УРАГАН, без привлечения сторонних погодных данных.

Интенсивность потока мюонов в значительной степени определяется атмосферными условиями, в первую очередь давлением на уровне наблюдения и темпера-

турным высотным разрезом атмосферы. При росте давления интенсивность потока мюонов падает в силу их поглощения, при снижении – наоборот. Температурный эффект значительно сложнее. При росте температуры атмосфера расширяется, что приводит к увеличению вероятности распада мюонов (уменьшению потока на поверхности Земли). С другой стороны увеличивается вероятность распада родительских частиц (увеличивается поток мюонов на поверхности Земли). Знак эффекта определяется пороговой энергией детектора. Для МГ УРАГАН она составляет 200–400 МэВ в зависимости от зенитного угла и знак эффекта – отрицателен. Кроме стационарных атмосферных условий интенсивность потока мюонов может модулироваться вследствие мощных нестационарных процессов в атмосфере. Такие процессы могут быть связаны с развитием грозовых очагов, которые являются источником сильной атмосферной турбулентности и возмущений волнового типа.

Гроза является комплексным явлением образования и развития кучево-дождевого облака, которое сопровождается многократными электрическими разрядами в виде молний и звуковым эффектом – громом. Грозовое облако – это локальная область резко выраженной конвективной и электрической активности. Оно может состоять из одной или нескольких грозовых ячеек. Средний радиус основания такой ячейки примерно равен 2 км, в умеренных широтах вершина типичной ячейки расположена на высотах порядка 8–12 км. Обычно развитие грозового облака делят на три стадии: зарождение, развитие (зрелость) и распад. Время жизни ячейки от момента её формирования до распада составляет около одного часа [3].

*E-mail: APKachur@mephi.ru

†E-mail: ANDmitriyeva@mephi.ru

‡E-mail: AAKovylyayeva@mephi.ru

§E-mail: VVShutenko@mephi.ru

Поток мюонов формируется в атмосфере на высоте 10–20 км при взаимодействии первичных космических лучей с веществом атмосферы. Таким образом, области генерации мюонов и развития грозových ячеек частично перекрываются; при этом возможно влияние последних на распределение потока мюонов. Изучение вариаций потока мюонов на поверхности Земли позволяет получить информацию о характере этого влияния.

Для подобных измерений используются мюонные годоскопы (МГ) – установки, обладающие широкой апертурой и высоким угловым разрешением, способные в непрерывном режиме регистрировать пространственный поток мюонов в виде двумерных «снимков-матриц» одновременно со всех направлений. Такая информация позволяет отделить влияние локальных атмосферных эффектов от гелиосферных и магнитосферных факторов, изменяющих поток мюонов в больших пространственных масштабах и приводящих к более длительным эффектам, нежели метеорологические явления.

В настоящей работе использованы данные, полученные на МГ УРАГАН [4] (Установка для РАСпознавания Грозových АНОмалий) – широкоапертурном прецизионном трековом детекторе, входящем в состав уникальной научной установки «Экспериментальный комплекс НЕВОД» и работающем в её составе с 2006 г. Он обеспечивает одновременную регистрацию мюонов в широком диапазоне зенитных углов (от 0° до 80°) и высокую пространственную и угловую точность (соответственно 1 см и 0.8°).

УРАГАН состоит из четырёх независимых супермодулей (СМ) (используются данные трёх СМ, т.к. на СМ02 проводятся тестовые измерения), каждый СМ представляет собой сборку из восьми плоскостей стримерных трубок, его рабочая площадь составляет 11.5 м². Каждая плоскость собрана из 320 трубок и алюминиевых стрипов. «Х»-стрипы располагаются вдоль стримерных трубок с одной стороны, а «У»-стрипы – поперёк них, с другой. При прохождении заряженной частицы через внутренний объём трубки образуется стример, электромагнитный сигнал от которого по стрипам поступает в регистрирующую систему. Условием выработки триггера при регистрации события является наличие сигналов с «Х»-стрипов 4-х и более плоскостей в пределах временных ворот 300 нс. Средний темп счёта одного СМ составляет примерно 1700–1900 триггеров в секунду.

Отклик СМ содержит информацию о сработавших стрипах в проекциях X и Y. Параметры треков частиц (два проекционных угла) восстанавливаются в режиме реального времени и накапливаются в двумерном массиве в течение минутного интервала. Такой массив данных (матрица) представляет собой «мюонную фотографию» верхней полусферы с минутной экспозицией.

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА МЮОНОВ ПО ДАННЫМ МГ УРАГАН

Для анализа углового распределения потока мюонов используется вектор локальной анизотропии **A**, представляющий собой сумму единичных векторов треков частиц, нормированную на число треков. Он указывает среднее направление прихода мюонов. Вектор локальной анизотропии и его проекции – характеристики, получаемые в реальном времени.

Дополнительную информацию позволяет получить разница текущего вектора анизотропии **A** и некоторого среднего его значения **A_N**, вычисленного по ранее набранным данным.

Разница этих векторов **r** (относительный вектор анизотропии) и его горизонтальная проекция r_{hor} , вычисляемые по формуле (1), показывают, в каком направлении и в какой степени произошла деформация углового распределения потока частиц.

$$\mathbf{r} = \mathbf{A} - \mathbf{A}_N, \quad r_{\text{hor}} = \sqrt{r_{\text{south}}^2 + r_{\text{east}}^2}. \quad (1)$$

Для анализа вариаций периодических сигналов во временных рядах темпа счёта и характеристик зенитно-угловых распределений выполняется вейвлет-обработка с использованием модифицированного вейвлета Морле [5]. Данный метод обработки позволяет выделить частоты наиболее существенных периодических процессов, наблюдаемых в характеристиках потока мюонов.

Для анализа грозových событий также используются мюонографии верхней полусферы, которые представляют собой визуализированные 5-минутные матрицы изменений углового распределения регистрируемого потока частиц относительно предшествующих 24 часов, выраженные в единицах статистической погрешности. Пример мюонографии для грозového события, наблюдавшегося 26.04.2018, представлен на рис. 1, где синий цвет обозначает недостаток, а красный – избыток частиц. На рисунке видна характерная область понижения темпа счёта мюонов.

В настоящей работе использовались пятиминутные временные ряды объединённого темпа счёта мюонов (I_{sum}) по трём СМ (СМ01, СМ03, СМ04), модуля вектора локальной анизотропии (**A**), модуля относительного вектора анизотропии (**r**) и его горизонтальной проекции, а также проекций на географические оси и на ось Z (r_{hor} , r_{south} , r_{east} и r_z). Также использовались результаты вейвлет-анализа темпа счёта и характеристик зенитно-угловых распределений и мюонографии.

2. МЕТОД ОТБОРА СОБЫТИЙ

Поиск соответствующих грозам возмущений характеристик потока мюонов в настоящей работе был реализован автоматически методом выделения во временных рядах значительных отклонений (далее выбросов)

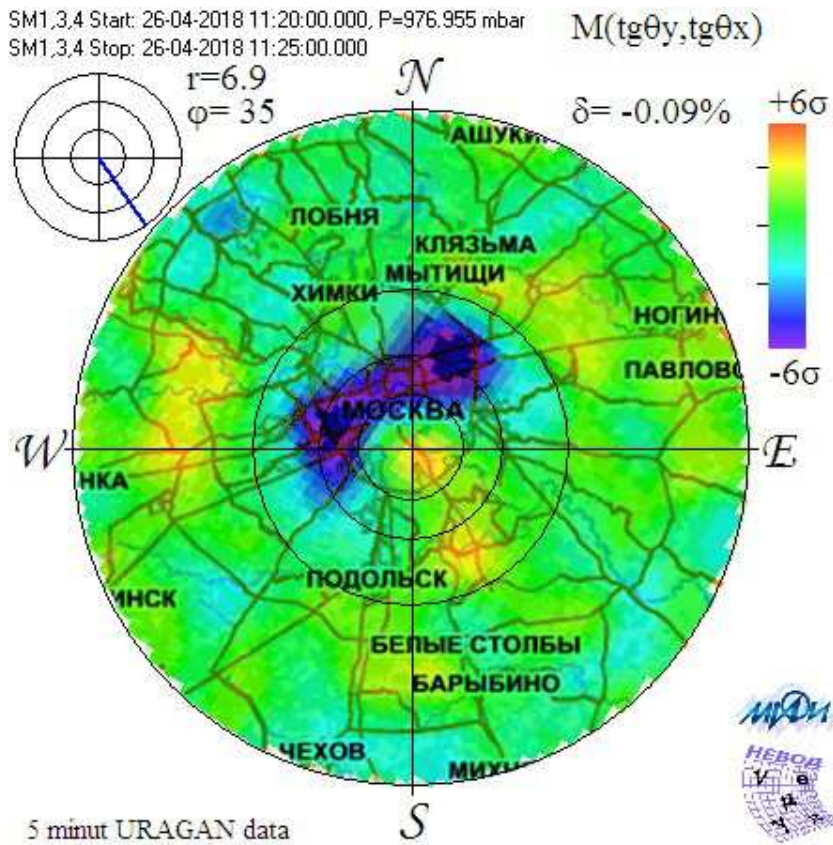


Рис. 1: Пример изображения 5-минутной матрицы изменений углового распределения потока мюонов для события 26.04.2018

значений характеристик потока мюонов от их скользящего среднего.

Скользящее среднее (англ. moving average, МА) – это динамически изменяющееся среднее значение, которое последовательно рассчитывается при передвижении по временному ряду на один шаг при установленной продолжительности окна усреднения. МА позволяет отделить тренды, связанные с различными долгосрочными процессами, от высокочастотных изменений, возникающих в связи с краткосрочными явлениями.

Т.к. период существования грозовой ячейки составляет менее часа, было сделано предположение, что выбросы относительно выделяемого МА тренда могут служить индикатором грозовых событий.

Усреднение проводилось за одно-, шести- и двенадцатичасовой интервал двумя способами: по значениям из интервала, предшествовавшего рассматриваемому моменту, и по значениям из интервала с рассматриваемым моментом в центре. В обоих случаях само значение характеристики в рассматриваемый момент в усреднение не включалось.

Первый способ был реализован с целью изучения возможности обработки данных в реальном времени, т.е. при наличии исключительно предшествующих рассматриваемому моменту данных, а также для определения потенциальных предикторов грозовых событий. Второй способ рассматривался для выделения событий

из имеющихся данных и подробного изучения их особенностей. Как будет показано далее, МА по предшествующим данным также удовлетворяет этой задаче и обеспечивает большую точность выделения событий, чем МА по окружающим данным.

Ширина окна усреднения варьировалась с целью выбора оптимальной, т.е. такой, при которой метод позволит выделить максимальное количество подтвержденных данными метеонаблюдений гроз и покажет при этом минимальное количество ложных срабатываний.

Для рассмотрения были выбраны следующие характеристики: I_{sum} , r_{south} , r_{east} и r_z . Были обработаны данные МГ УРАГАН за весенне-летние (с мая по август включительно) периоды 2014–2017 годов.

Первым этапом обработки являлось вычисление временных рядов МА и отклонений от них за выбранный период времени для вышеназванных характеристик. Следующим – построение распределения полученных рядов отклонений.

Отклонение характеристики X от её скользящего среднего $MA(X)$ в момент времени i определяется следующим образом:

$$\Delta_{X,i} = X_i - MA_i(X).$$

Распределения величин $\Delta_{I_{sum}}$, $\Delta_{r_{south}}$, $\Delta_{r_{east}}$ и Δ_{r_z} близки к нормальным.

Таблица I: Число выбросов относительно усреднения за 6 часов по окружающим данным с 01.05.2014 по 06.05.2014

Дата	$ \Delta_{I_{sum}} >$			$ \Delta_{r_z} >$			$ \Delta_{r_{south}} >$			$ \Delta_{r_{east}} >$		
	3σ	4σ	5σ	3σ	4σ	5σ	3σ	4σ	5σ	3σ	4σ	5σ
01.05.2014	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
03.05.2014	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
04.05.2014	2	1	0	2	1	0	1	0	0	1	0	0
05.05.2014	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06.05.2014	2	1	0	1	0	0	1	0	0	3	0	0

Таблица II: Эффективность различных условий отбора (усреднение за 1 час по предшествующим данным)

№	Условия отбора	Выявленные грозы	Выявленные ливни	Выявленные снегопады	Ошибочные срабатывания	Ошибочные срабатывания без учёта ливней и снегопадов
1	$(3\sigma > 2 \text{ и } 4\sigma > 0)$ или $5\sigma > 0$	60%	13%	40%	6%	33%
2	$(3\sigma > 3 \text{ и } 4\sigma > 0)$ или $5\sigma > 0$	60%	11%	20%	3%	26%
3	$3\sigma > 5$	52%	11%	20%	17%	40%
4	$4\sigma > 0$	61%	16%	40%	9%	38%

Далее проводился непосредственный поиск выбросов, которые были определены как $|\Delta_{X,i}|$, превышающие заданную величину в единицах стандартного отклонения (σ). Поиск проводился для трёх уровней выбросов: свыше 3σ , 4σ и 5σ .

Полученные таблицы выбросов, содержащие их значения и соответствующие им моменты времени, для дальнейшего поиска гроз сводились к таблицам, содержащим даты, в которые $|\Delta_{X,i}|$ хотя бы одной из рассматриваемых характеристик потока мюонов хотя бы раз превышал уровень 3σ . Таблицы также содержат число выбросов в указанные даты (см. табл. I).

Таким образом, результатом обработки являются шесть подобных таблиц (по числу комбинаций параметров обработки: усреднения за 1, 6 и 12 часов по предшествующим или окружающим данным), каждая из которых содержит порядка 400 строк. Это означает, что единичные выбросы свыше 3σ не могут служить критерием грозового события, т.к. встречаются практически ежедневно.

Для создания удовлетворяющего задаче условия отбора событий таблицы выбросов были сопоставлены с таблицей метеоявлений, составленной по данным метеостанций «ВДНХ», «Балчуг» и аэропорта «Домодедово» [6]. Помимо гроз в неё включены снегопады и сильные ливневые осадки, т.к. известно, что их прохождение непосредственно над МГ УРАГАН может оказывать влияние на регистрируемые характеристики потока мюонов. Сопоставление данных показало, что гроза может привести как к возмущениям (от умеренных до сильных) всех рассматриваемых характеристик, так и к сильному возмущению только одной из них. На основании этого было предложено несколько

различных условий отбора вида «необходимое количество выбросов выше определённого уровня за выбранную дату» и определена их эффективность.

При определении эффективности погодное явление считалось выявленным, если выполнялось рассматриваемое условие отбора и при этом хотя бы на одной из метеостанций в рассматриваемые сутки наблюдались ливень, гроза или снегопад. Если рассматриваемое условие отбора выполнялось при отсутствии всех вышеуказанных метеоявлений, такое срабатывание считалось ошибочным.

Кроме того, учитывались геомагнитные эффекты. Даты, в которые характеризующие геомагнитную активность индексы Kp (планетарный индекс, вычисляется как среднее значение Kp -индексов, определённых на 13-ти геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44 и 60 градусами северной и южной геомагнитных широт) и Dst (индекс геомагнитной активности, нТл) [7] выходили за рамки значений умеренно возмущённой магнитосферы, были исключены из рассмотрения. Это связано с наличием отклика МГ УРАГАН на магнитные бури.

Для трёх из четырёх предложенных условий отбора (№№ 1, 2 и 4 табл. 2) лучшей комбинацией параметров обработки скользящим средним оказалось усреднение с окном в один час по предшествующим данным. В табл. 2 приведены результаты поиска событий с использованием различных условий отбора для этой комбинации.

Условия отбора в табл. 2 расшифровываются следующим образом: $(3\sigma > 2 \text{ и } 4\sigma > 0)$ или $5\sigma > 0$ означает, что метод срабатывает, когда одновременно присутствуют более двух выбросов свыше уровня 3σ и хотя

Таблица III: Количество выявленных метеоявлений (условие отбора: ($3\sigma > 3$ и $4\sigma > 0$) или $5\sigma > 0$)

Тип явления	На скольких метеостанциях наблюдалось явление	Количество явлений по метеоданным	Количество выявленных явлений	Процент выявленных явлений
Гроза	1	39	12	31%
	2	30	20	67%
	3	31	28	90%
	Всего	100	60	60%
Ливень	1	39	1	2%
	2	47	6	13%
	3	81	11	14%
	Всего	167	18	11%
Снегопад	1	1	0	0%
	2	2	0	0%
	3	2	1	50%
	Всего	5	1	20%

бы один выброс выше уровня 4σ , или тогда, когда присутствует хотя бы один выброс выше уровня 5σ .

В столбцах «выявленные грозы», «ливни» и «снегопады» приведено процентное отношение числа срабатываний при наличии метеоявления к полному числу явлений этого типа по данным метеостанций. В столбце «ошибочные срабатывания» приведён процент срабатываний в отсутствие каких бы то ни было метеоявлений. В столбце «ошибочные срабатывания без учёта ливней и снегопадов» приведён процент ошибочных срабатываний, если считать таковыми все срабатывания, при которых по данным метеостанций не наблюдалось гроз.

Видно, что исключение ливней и снегопадов из рассмотрения приводит к весьма значительному ухудшению точности. Хотя чувствительность к данным метеоявлениям мала, случаи срабатывания, связанные с ливнями и снегопадами, нельзя считать ошибочными, т.к. они могут быть вызваны развитием данных метеоявлений непосредственно над МГ УРАГАН или локальными грозами, не зарегистрированными на метеостанциях.

Помимо неточности метода ошибочные срабатывания могут быть связаны как с наличием неучтённых внеатмосферных возмущений потока мюонов, так и с несоответствием использованных метеоданных трёх выбранных метеостанций по отношению к географическому положению МГ УРАГАН.

Случаи же отсутствия срабатывания при наличии грозы можно объяснить её локальным характером или относительно малой высотой формирования ячейки такой грозы.

В качестве оптимального условия отбора было выбрано условие 2, для которого приведена табл. 3. В ней показано, как меняется процент выявленных метеоявлений в зависимости от числа метеостанций, на кото-

рых они наблюдались (т.е. от обширности метеоявления).

По данным табл. 3 видно, что эффективность тем выше, чем на большем количестве метеостанций было зарегистрировано явление. Наиболее точно метод выделяет грозы и ливни, наблюдавшиеся на всех трёх метеостанциях (т. е. наблюдавшиеся на большей части территории Москвы и/или прошедшие непосредственно над МГ УРАГАН). Сделать аналогичный вывод о снегопадах не представляется возможным из-за малой статистики в рассматриваемые (весенне-летние) периоды.

В результате отбора был составлен список дат гроз, наблюдавшихся в Московском регионе в весенне-летние периоды 2014–2017 гг. и имевших отклик в данных МГ УРАГАН. Всего за указанные периоды метод выявил шестьдесят таких дат. Для 36-ти из них проводился подробный анализ отклика МГ УРАГАН на рассматриваемое событие с целью расширения и систематизации статистики, а также для установления типичных для гроз возмущений в характеристиках потока мюонов.

3. АНАЛИЗ ОТКЛИКА МГ УРАГАН НА ГРОЗОВОЕ СОБЫТИЕ

Описание грозового события включает в себя следующую информацию, представленную для периода его зарождения и прохождения и предшествующего ему периода:

- время наблюдения грозы на метеостанциях «ВД-НХ», «Домодедово» и «Балчуг»;
- зависимости давления, приземной температуры и осадков от времени по данным метеостанции

Vaisala, расположенной на территории экспериментального комплекса НЕВОД;

- временные ряды I_{sum} , r , r_{hor} , r_{east} и r_{south} ;
- визуализированные результаты вейвлет-анализа временных рядов I_{sum} , A и r_{hor} ;
- визуализированные матрицы изменений углового распределения мюонов.

Ниже в качестве примера приведено краткое описание грозы, произошедшей 04.06.2016. На метеостанциях «Балчуг» и аэропорта «Домодедово» гроза наблюдалась в 14:00 UTC, на метеостанции «ВДНХ» – несколько гроз в период с 12:00 до 17:00 UTC. На рис. 2 представлены зависимости давления, приземной температуры и осадков от времени, зарегистрированные метеостанцией Vaisala, расположенной на крыше экспериментального корпуса НЕВОД. По рисунку видно, что в рассматриваемый период осадки отсутствовали, т.к. непосредственно над детектором гроза не наблюдалась.

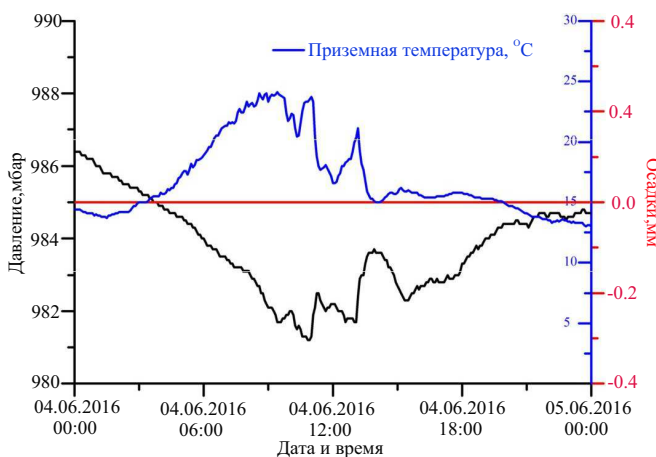


Рис. 2: Зависимости давления (чёрная линия), приземной температуры (синяя линия) и осадков (красная линия) от времени, зарегистрированные 04.06.16 метеостанцией Vaisala

Далее представлены графики зависимости I_{sum} (рис. 3) и r_{east} (рис. 4) за период, соответствующий грозовому событию. На них присутствуют выбросы в момент времени 11:30 UTC, характерные для грозового события.

На рис. 5 и рис. 6 представлены результаты вейвлет-анализа A и I_{sum} , которые показывают, что с 11:00 по 17:00 UTC в характеристиках потока мюонов резко усилились возмущения с периодами 60–120 минут, что является типичным для грозовых событий. Цветовая градация (от синего до красного) отражает изменение значений вейвлет-коэффициентов (от минимального до максимального).

Далее грозовое событие рассмотрено подробнее с использованием серии мюнографий («мюонных снимков» с наложением карты Московского региона), демонстрирующей пространственное изменение темпа

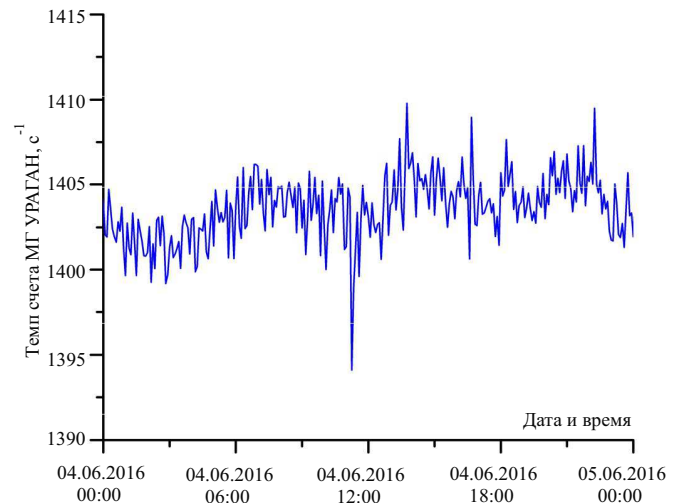


Рис. 3: Временной ряд 5-минутных значений темпа счёта I_{sum} 04.06.16

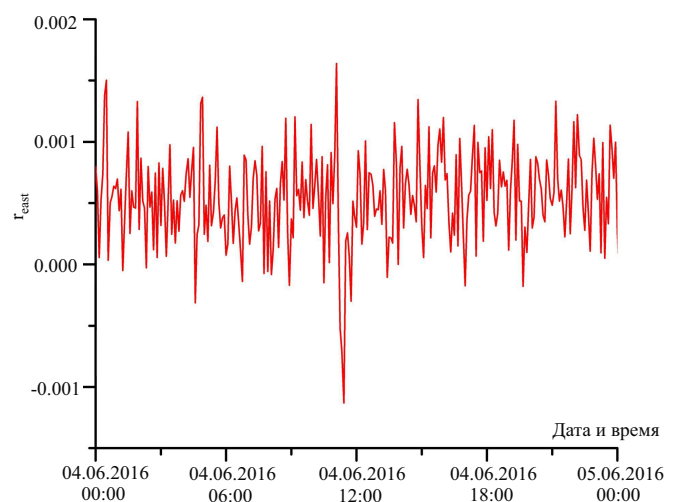


Рис. 4: Временной ряд 5-минутных значений проекции от носительного вектора анизотропии на ось запад восток r_{east} 04.06.16

счёта мюонов. На рис. 7 видна динамика возникновения и исчезновения характерной для грозового события локальной области значительного недостатка мюонов (сине-фиолетовая область), обусловленной движением области повышенного давления. Эффект сохраняется на протяжении 15–20 минут. Этот временной интервал составляет примерно треть времени жизни типичной грозовой ячейки и может соответствовать какой-либо из стадий её развития. Видно, что область недостатка мюонов в ходе развития грозы смещается на северо-запад, разделяясь на несколько меньших областей.

Анализ остальных 35-ти грозовых событий показал аналогичные результаты, позволив выделить характерные особенности отклика МГ УРАГАН на грозу, описанные в Заключение.

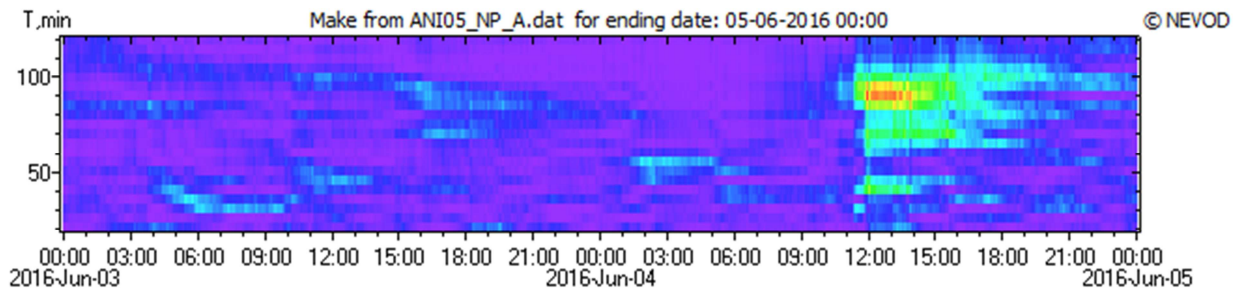


Рис. 5: Мощность вейвлет-коэффициентов для частот с периодами 20–120 минут по 5-минутному временному ряду A с 03.06.16 по 05.06.16

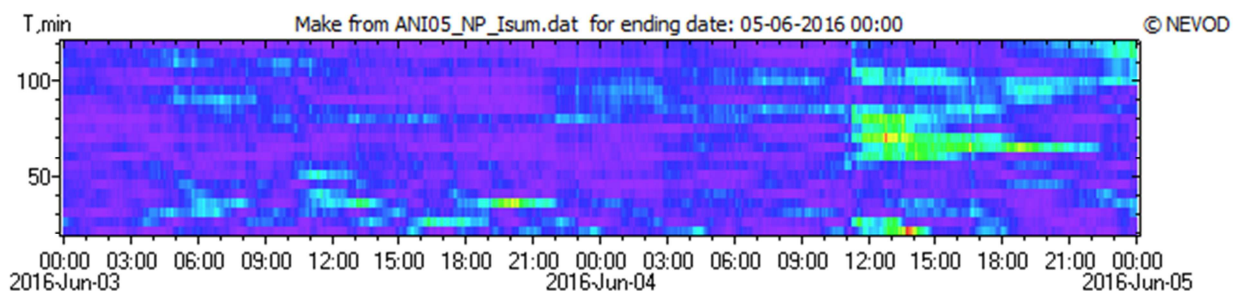


Рис. 6: Мощность вейвлет-коэффициентов для частот с периодами 20–120 минут по 5-минутному временному ряду I_{sum} с 03.06.16 по 05.06.16

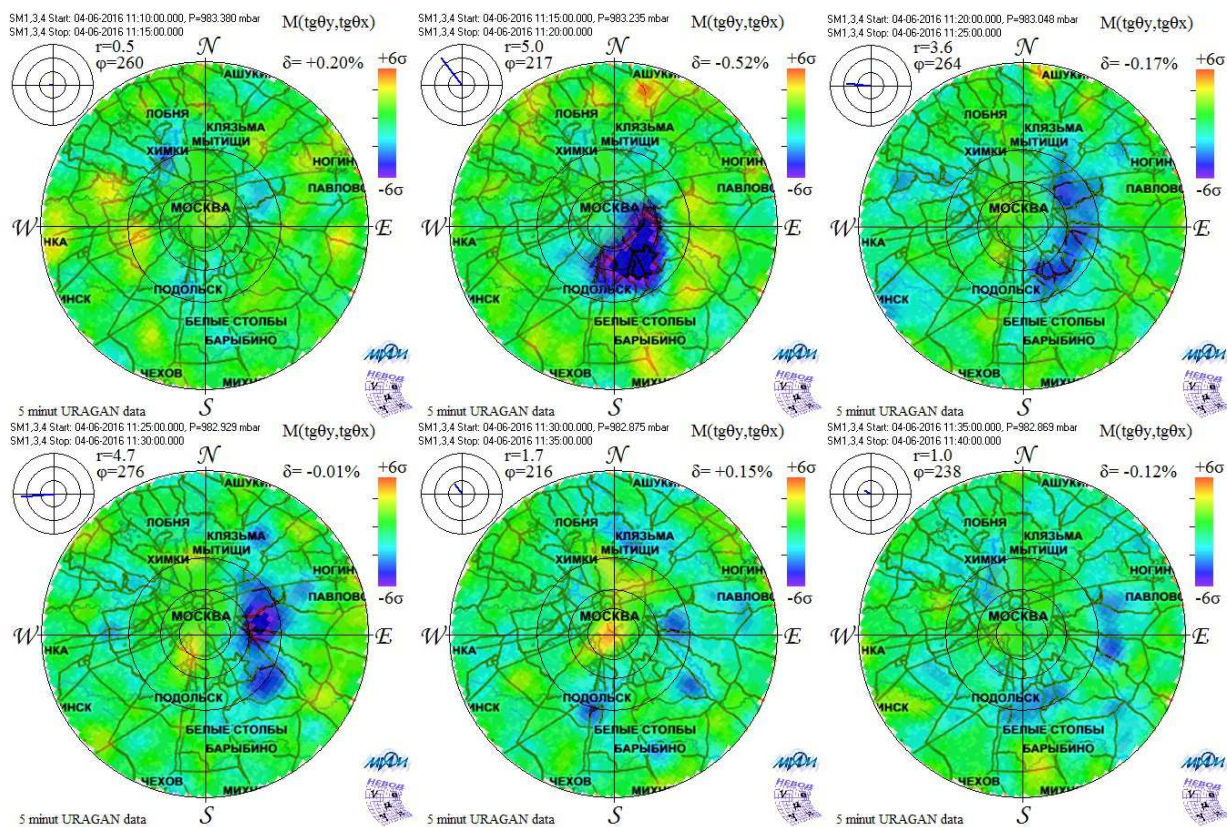


Рис. 7: Серия мюнограмм для интервала 04.06.16 с 11:10 по 11:40

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика отбора грозовых событий, давших отклик в данных МГ УРАГАН. Изучение отобранных с её помощью событий позволило установить, что отклик МГ УРАГАН на них имеет место как в случае прохождения грозы непосредственно над детектором, так и в случае, когда гроза непосредственно над детектором не наблюдалась. Установлено, что характерными для грозового события возмущениями темпа счёта мюонов I_{sum} и проекций относительного вектора анизотропии r_{south} , r_{east} , r_z являются одиночные выбросы, обычно возникающие несколько раз за период прохождения грозы. Вейвлет-анализ временных рядов показал, что во время прохождения грозы и/или в предшествующий ей период в характеристиках потока мюонов, зарегистрированных МГ УРАГАН, наблюдаются периодические возмущения с периодами в диапа-

зоне от одного до пяти часов. Изучение мюонографий показало, что грозовое событие зачастую сопровождается появлением локальной области понижения темпа счёта мюонов, время существования которой (порядка 20 мин) сопоставимо с временем жизни типичной грозовой ячейки.

Благодарности

Авторы выражают благодарность коллективу Научно-образовательного центра НЕВОД.

Работа выполнена на уникальной научной установке «Экспериментальный комплекс НЕВОД» при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект RFMEFI59114X0002; ПКС НИЯУ МИФИ, проект 02.a03.21.0005).

-
- [1] Барбашина Н. С., Борог В. В., Дмитриева А. Н., Кокоулин Р. П., Компаниец К. Г., Петрухин А. А., Тимашков Д. А., Шутенко В. В., Яшин И. И. Изв. РАН. Сер. физ. 2007. **71**. № 7. С. 1069.
- [2] Яшин И. И., Ампилогов Н. В., Астапов И. И., Барбашина Н. С., Борог В. В., Дмитриева А. Н., Кокоулин Р. П., Компаниец К. Г., Маннокки Дж., Михайленко А. С. и др. Изв. РАН. Сер. физ. 2013. **77**. № 5. С. 621.
- [3] Ермаков В. И., Стожков Ю. И. Физика грозовых облаков. ФИАН. М., 2004.
- [4] Барбашина Н. С., Кокоулин Р. П., Компаниец К. Г., Маннокки Дж., Петрухин А. А., Сааведра О., Тимашков Д. А., Тринкери Дж., Чернов Д. В., Шутенко В. В. и др. ПТЭ. 2008. № 2. С. 26.
- [5] Yashin I. I., Astapov I. I., Barbashina N. S., Borog V. V., Dmitrieva A. N., Kokoulin R. P., Kompaniets K. G., Petrukhin A. A., Shutenko V. V., Yakovleva E. I. Adv. in Space Res. 2015. **56**. Iss. 12. P. 2693.
- [6] Архивы погоды // Погода и климат. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> (дата обращения: 08.05.2018).
- [7] Mayaud P. N. Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices, Geophysical Monograph 22. Washington, DC: American Geophysical Union, 1980.

Response of the muon hodoscope URAGAN to the thunderstorm events occurred in the Moscow region

A. P. Kachur^a, A. N. Dmitrieva^b, A. A. Kovylyayeva^c, V. V. Shutenko^d

Experimental Complex NEVOD, National Research Nuclear University MEPHI. Moscow 115409, Russia
E-mail: ^aAPKachur@mephi.ru, ^bANDmitriyeva@mephi.ru, ^cAAKovylyayeva@mephi.ru, ^dVVShutenko@mephi.ru

The flux of muons generated in the atmosphere is sensitive to changes of its basic thermodynamic parameters along the particle trajectory. This dependence is used for the muon diagnostics of the atmosphere. It can be used to trace the dynamics of such events as thunderstorms. In this work the search of thunderstorm-caused disturbances of the muon flux registered by the muon hodoscope URAGAN was conducted by an automatic method of finding of the significant deviations of the current values of the muon counting rate (I_{sum}) and local anisotropy parameters (r_{south} , r_{east} , r_z) from their moving average. The dates selected by this way were compared with the thunderstorm observation dates from the data of three independent meteorological stations «Domodedovo», «VDNKh» and «Balchug» as well as with the data of the meteorological station located in the Experimental Complex NEVOD. The analysis of the obtained data showed that the characteristic events for a thunderstorm are single deviations in the considered parameters, which usually occur several times during a thunderstorm. Also, during a thunderstorm, periodic perturbations with periods in the range from one to five hours are found in the characteristics of the muon flux.

PACS: 92.60.Wc.

Keywords: muon diagnostics of the Earth's atmosphere, thunderstorm, intensity of cosmic ray muons, variations of the muon flux.

Received 14 May 2018.

Сведения об авторах

1. Качур Александра Петровна — студент, инженер; e-mail: APKachur@mephi.ru.
 2. Дмитриева Анна Николаевна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 788-56-99, доб. 9927, e-mail: ANDmitriyeva@mephi.ru.
 3. Ковыляева Анна Александровна — аспирант, инженер 2 кат; e-mail: AAKovylyaeva@mephi.ru.
 4. Шутенко Виктор Викторович — канд. физ.-мат. наук, вед. инженер; тел.: (495) 788-56-99, доб. 8796, e-mail: VVShutenko@mephi.ru.
-