

## Определение параметров холодного фронта циклона “Кирилл” по синхронным измерениям давления и потока мюонов

А. А. Сопин, Ю. М. Ямпольский

*Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: sopin@rian.kharkov.ua*

*Статья поступила в редакцию 26 октября 2010 г.*

Представлены результаты совместного анализа вариаций приземного давления и потока мюонов во время прохождения над Европой урагана “Кирилл”, регистрируемых в мониторинговом режиме в низкочастотной обсерватории Радиоастрономического института НАН Украины. Обнаружен и объяснен временной сдвиг между этими процессами. В рамках общепринятой модели холодного циклонического фронта определены его пространственно-временные параметры, в частности, угол наклона и горизонтальная протяженность. Результаты согласуются с известными данными.

**Ключевые слова:** циклон, холодный фронт, космические лучи, мюон, тропосфера, ГНСС

### 1. Введение

Актуальными направлениями современной физики геокосмоса являются исследования взаимосвязей тропосферной и космической погодных систем и развитие методов дистанционной диагностики атмосферы и ближнего космоса. Дистанционная диагностика основана на взаимодействии пробных сигналов различной природы с нейтральным и плазменным окружением Земли. В последнее время появились публикации, в которых представлены результаты использования в качестве “зондирующего сигнала” потоков вторичных космических лучей (КЛ) [1, 2]. Это направление развивается и в настоящей работе. Физической предпосылкой данного метода диагностики является взаимодействие КЛ как с магнитным полем Земли, так и с частицами атмосферы. Интенсивность этого взаимодействия зависит от параметров среды, в которой распространяются частицы, и от их энергии. Условно источники вариаций интенсивности вторичных КЛ можно разделить на две части: внеземного и земного происхождения (атмосферного и геомагнитного) [3]. Вариации

атмосферного происхождения обусловлены различными метеорологическими эффектами, приводящими к изменению условий генерации и прохождения частиц через атмосферу. Поток мюонов, достигая поверхности Земли, несет в себе информацию о состоянии и динамике околоземного пространства и атмосферы [1, 2]. Следовательно, регистрация и последующий анализ мюонных данных могут дать сведения о процессах в тропосфере и могут быть использованы для их изучения.

Современный подход к дистанционному мониторингу атмосферы с помощью КЛ основывается на обширных материалах экспериментальных и теоретических исследований, полученных во второй половине XX в. [3]. В этих исследованиях основной целью было изучение природы первичных КЛ и факторов, влияющих на интенсивность потока вторичных КЛ у поверхности Земли. В настоящее время решается обратная задача – осуществляется восстановление характеристик атмосферы по измерениям временных вариаций потока мюонов у поверхности Земли.

В работе предпринята попытка изучения динамики тропосферного события – заключительной фазы мощного циклона “Кирилл” – по данным о вариациях метеопараметров и интенсивности потока мюонов.

## 2. Экспериментальные данные

Основные экспериментальные данные, использованные в работе, получены в низкочастотной обсерватории (НЧО) Радиоастрономического института НАН Украины (с. Мартовья Харьковской обл., 49°56′ с. ш., 36°57′ в. д.) <<http://ri.kharkov.ua/geospace/observatory.html>>. В обсерватории в непрерывном режиме функционирует приемно-измерительный научно-исследовательский комплекс аппаратуры электромагнитного зондирования окружающей среды. Комплекс предназначен для изучения и диагностики тропосферы и геокосмоса. В работе использовались также метеорологические данные, доступные в сети Интернет.

Интенсивность потока мюонов измерялась специальным мюонным телескопом [4], созданным в Восточнoукраинском национальном университете имени В. Даля. В детекторе мюонов используется параллелепипед с размерами 0.2×0.2×0.1 м из полиметилметакрилата со сцинтилляционной добавкой. Характерная ширина диаграммы направленности приемной “антенны” составляет около 100°. Атмосферное давление измерялось автоматической метеомангнитной станцией LEMI №17 <<http://www.isr.lviv.ua/lemi017ru.htm>>. Темп опроса обоих приборов составлял 1 с, синхронизация по времени осуществлялась GPS приемником. Регулярные метеорологические наблюдения и регистрация мюонов в НЧО проводятся с января 2007 г. Результаты предварительной обработки накапливаемых данных в реальном времени доступны в Интернете на сайте отдела радиофизики геокосмоса РИ НАН Украины <<http://ri.kharkov.ua/geospace>>.

Для проведения исследований в рамках настоящей работы были совместно использованы данные о давлении и потоке мюонов за 2007–2008 гг. Особое внимание было уделено тропосферным событиям, во время которых наблюдались значительные перепады дав-

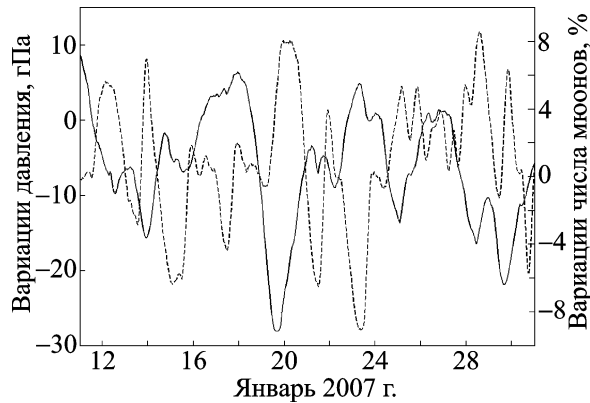
ления (более 20 гПа), в частности, заключительной фазе штормового циклона “Кирилл”, прошедшего над Европой 18-20 января 2007 г. Метеорологические процессы в главной фазе этого погодного фронта над Центральной Европой подробно освещены в [5], а ионосферные эффекты, порожденные этим аномальным атмосферным явлением, проанализированы в работе [6].

## 3. Результаты измерений и обработки данных

Результаты обработки накопленных в НЧО данных показывают, что мюонный телескоп работает стабильно на протяжении трех лет эксплуатации. Барометрический коэффициент, связывающий относительные вариации потока мюонов и давления, полученный по данным за два года, оценивается значением 0.22 % /гПа, что согласуется со значениями, приводимыми для мюонных детекторов подобной конструкции [7-9].

Представляет интерес обнаружение запаздывания значительных вариаций потока мюонов относительно аномальных вариаций атмосферного давления. Подобные эффекты были обнаружены довольно давно [10, 11], однако до настоящего времени не использовались для диагностики самого погодного фронта. Величина этого запаздывания изменяется в зависимости от пространственной структуры и скорости переноса атмосферных масс, изменения которых в свою очередь приводят к заметным вариациям потока КЛ, регистрируемого наземным наблюдателем.

Основным объектом исследований являлся циклонический шторм “Кирилл” в его периферической части над территорией Восточной Украины. На рис. 1 приведены графики вариаций давления и потока мюонов с 11 по 31 января 2007 г., т. е. перед ураганом, во время и после него. Прохождение этого атмосферного фронта сопровождалось сильным перепадом давления 18–19 января более чем на 30 гПа. Следует отметить, что такой перепад давления являлся экстремально большим, значительно превышающим среднеквадратическое отклонение вариаций давления за весь двухлет-

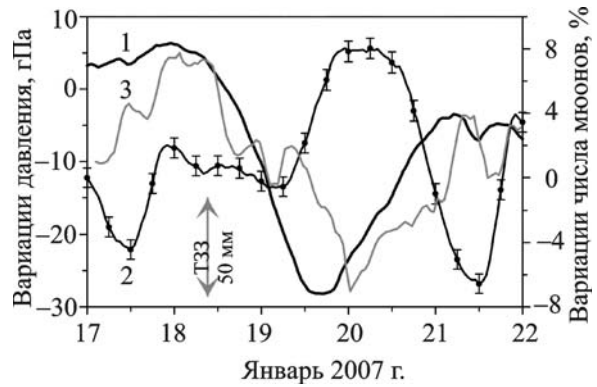


**Рис. 1.** Временные зависимости вариаций давления (сплошная линия) и потока мюонов (пунктирная линия)

ний период наблюдений (~ 8 гПа). Вариации потока мюонов сглажены методом скользящего среднего с использованием прямоугольного окна длительностью 5 ч с шагом 1 ч. Процедура сглаживания была проведена для устранения “быстрых” вариаций потока мюонов, не связанных с изменениями давления.

Временные зависимости на рис. 1 демонстрируют заметную антикорреляцию во всем интервале наблюдений, что является следствием известного барометрического эффекта – при увеличении давления уменьшается поток КЛ, регистрируемый на поверхности Земли. Коэффициент корреляции, рассчитанный для вариаций, представленных на рис. 1, равен  $k = -0.54$ . Барометрический коэффициент оценен величиной  $k_p = -0.28 \text{ \% / гПа}$ .

На рис. 2 показан фрагмент зависимостей вариаций давления, потока мюонов и тропосферной зенитной задержки (ТЗЗ) радиосигналов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) в интервале времени, в течение которого непосредственно наблюдались проявления фронтальных процессов над Харьковом. Тропосферная задержка рассчитывалась при совместной обработке данных перманентных ГНСС станций и выражается в метрах как рефракционное удлинение траектории радиосигналов системы глобального позиционирования. Данные о задержке для станции “КНАР” (Харьков) с темпом 1 ч были



**Рис. 2.** Временные зависимости вариаций давления (кривая 1), потока мюонов (кривая 2) и ТЗЗ (кривая 3, масштаб показан стрелкой) во время прохождения урагана “Кирилл” над Харьковом

взяты из архива службы IGS (The International GNSS Service) <<http://garner.ucsd.edu/pub/troposphere/>>. Использование зависимостей ТЗЗ для анализа динамики фронтальных процессов обусловлено тем, что данная величина является интегральной характеристикой, зависящей от высотного распределения давления, влажности и температуры “над головой” наблюдателя [12]. Поскольку фронтальная зона разделяет области с резко отличающимися атмосферными параметрами, прохождение погодного фронта приводит к значительным изменениям ТЗЗ, что позволяет диагностировать динамику такого процесса.

Вариации ТЗЗ для анализируемого события имеют следующую особенность – положение минимума запаздывает относительно минимума давления и опережает положение максимума потока мюонов. Это связано с тем, что влажность воздуха падает по мере продвижения холодного фронта, спустя некоторое время большая часть водяного пара выпадает в виде осадков или переходит в твердую фазу. Поскольку ТЗЗ зависит от содержания водяного пара, при достаточно низком давлении формируются условия для наблюдения минимума ТЗЗ.

Около 14 часов 18 января давление упало ниже среднемесячного значения и продолжало уменьшаться вплоть до полудня 19 января. Минимальное давление, соответствующее

прохождению атмосферного фронта у поверхности земли, наблюдалось 19 января в 17 часов. Минимум давления выражен нечетко, представляет собой пологий и достаточно протяженный во времени интервал, в течение которого изменение давления не превышало 0.5 гПа, длительностью около семи часов. Характерный временной масштаб этого фронтального процесса можно оценить примерно в одни сутки. Перепад давления при этом составлял 28 гПа. Максимум потока мюонов был зарегистрирован в 5 часов 20 января, на двенадцать часов позже минимума давления.

#### 4. Обсуждение и интерпретация результатов

Первичные КЛ начинают интенсивно взаимодействовать с ядрами молекул воздуха на уровне 100 ÷ 200 гПа [13] (высоты 16 ÷ 11 км). В диапазоне геопотенциальных высот 100 ÷ 300 гПа расположена зона максимума интенсивности образования мюонов, которая в первом приближении может считаться их основным источником и ниже которой происходит только поглощение мюонов. При движении в атмосфере мюон теряет энергию на ионизацию [3]. Если он потерял энергию в начале своего пути, то вероятность того, что он достигнет поверх-

ности земли ниже, чем если такая потеря энергии произойдет в конце пути. Число мюонов, которые могут достигать поверхности, зависит от средней длины пройденного пути, количества и распределения плотности вещества на этом пути. Повышение атмосферного давления приводит к тому, что на пути распространения мюонов становится больше вещества, увеличивается поглощение и уменьшается их интенсивность, регистрируемая на поверхности Земли [9]. Аналогичное влияние оказывает рост температуры – тропосфера утолщается (увеличивается барическая ступень), увеличивается длина пройденного пути, и, как следствие, поток мюонов уменьшается. Перечисленные эффекты обуславливают большую часть метеорологических вариаций потока КЛ.

Обнаруженный временной сдвиг между моментами наблюдения экстремумов давления и потока мюонов может быть объяснен в рамках простой геометрической модели погодного фронта [12] (рис. 3) в предположении, что генерация мюонов происходит на одном фиксированном изобарическом уровне и не зависит от других факторов. Если считать, что интенсивность источника мюонов не меняется, наблюдаемые вариации потока мюонов определяются только изменением высотного

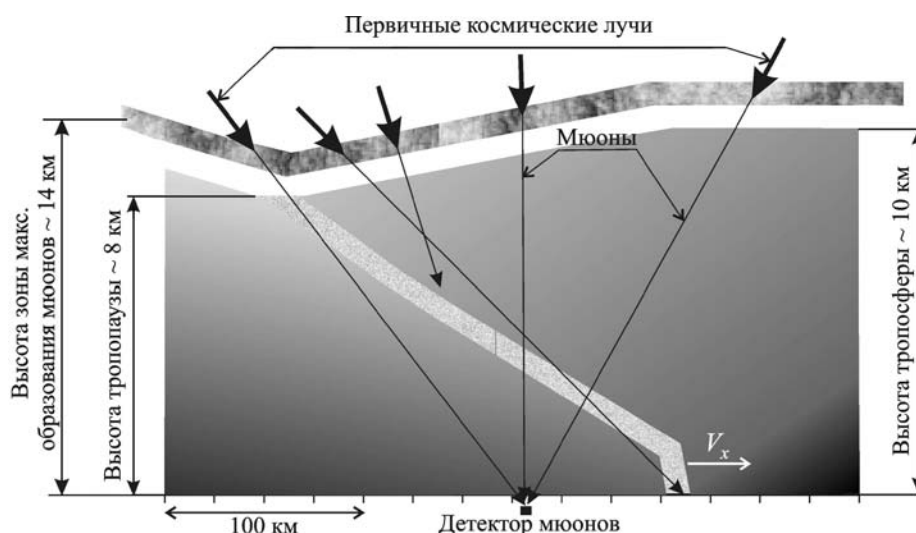


Рис. 3. Геометрическая модель холодного фронта

профиля давления, температуры и плотности воздуха в тропосфере, в слое между источником и детектором частиц. По мере распространения холодного фронта над пунктом наблюдения происходит замещение теплого воздуха холодным, средняя температура газа при этом снижается. Как следствие этого, уменьшается величина барической ступени – в холодной воздушной массе давление падает с высотой быстрее, чем в теплой. В результате на фиксированных высотах давление в теплом и холодном воздухе становится неодинаковым, в теплом оно выше. В целом в циклоне изобары “прогибаются” в виде воронок, снижаясь от периферии к центру. “Прогиб” изобар по высоте совпадает с положением фронтальной поверхности. Аналогичным образом ведет себя и тропопауза, над хорошо развитым циклоном она “прогнута” вниз и ее высота снижается. Таким образом, высота источника мюонов различна для теплых и холодных воздушных масс. В частности, еще в первых работах по этой тематике [11] было показано, что во время прохождения холодного фронта вариации высоты источника мюонов (поверхности 200 гПа) в зависимости от изменений давления составляла несколько сотен метров на высотах порядка 10 км.

Представленная модель предполагает, что максимум потока мюонов соответствует моменту завершения прохождения фронтальной зоны над детектором. В это время на фоне общего уменьшения количества вещества, связанного с падением давления, и понижения температуры происходит уменьшение высоты изобарического уровня, на котором расположен источник мюонов, что в совокупности дает предпосылки для наблюдения эффекта.

В используемой модели холодный фронт представляет собой двумерную граничную зону, разделяющую две воздушные массы, отличающиеся метеорологическими параметрами, наклоненную в сторону, противоположную движению фронта под небольшим углом ( $0.5^\circ \div 2^\circ$ ) к горизонту [12]. Из-за малого наклона поперечное сечение фронта растягивается на сотни километров. Момент прохождения фронтальной зоны у поверхности ха-

рактеризуется минимумом давления. Полученный из наблюдений временной сдвиг между минимумом давления и максимумом потока мюонов можно интерпретировать как задержку между моментами прохождения фронтальной зоны у поверхности и на высоте тропопаузы. Согласно данным радиозондов высота тропопаузы  $H$  над Харьковом 19–20 января 2007 г. была в пределах  $10.5 \div 8$  км <<http://weather.uwo.edu/upperair/europe.html>>. Таким образом, в рамках упрощенной модели фронта по величине измеряемого сдвига между вариациями приземного давления и потока мюонов  $\tau$  можно оценить вертикальную скорость перемещения фронтальной зоны,  $V_z \sim H/\tau$ . Оценки вертикальной скорости движения воздушных масс при значениях высоты тропопаузы  $H = 7, 8$  и  $9$  км и фиксированной временной задержке  $\tau = 12$  ч дают значения  $V_z = 0.16, 0.19$  и  $0.21$  м/с соответственно.

Горизонтальная скорость движения фронта определялась с учетом формы изолиний положения минимумов давления, построенных по данным европейских метеостанций <<http://meteo.infospace.ru/wcarch/html/index.sht>>, (рис. 4). Результаты работы [5], в которой описан процесс развития урагана “Кирилл”, и метеорологические данные показали, что циклон “Кирилл” дошел до Украины, замедляясь, теряя свою силу и разрушаясь. Так, например, форма перепада давления в Киеве и Харькове существенно не изменилась, но скорость падения давления восточнее, в Харькове, была меньше, чем в Киеве. Анализ изолиний дал возможность оценить направление движения циклона на завершающем этапе его существования – он двигался практически строго с запада на восток. Синхронные измерения давления в Киеве и Харькове (разнос между приемными пунктами составлял  $\sim 412$  км) позволили оценить временную задержку (6–7 ч), а следовательно, оценить горизонтальную скорость переноса воздушных масс ( $\sim 60 \div 70$  км/ч). С учетом того, что движение фронта с запада на восток постепенно замедлялось (расстояние между изолиниями уменьшается, см. рис. 4), горизонтальная скорость движения фронта непосредственно над Харьковом снизилась до 40 км/ч.

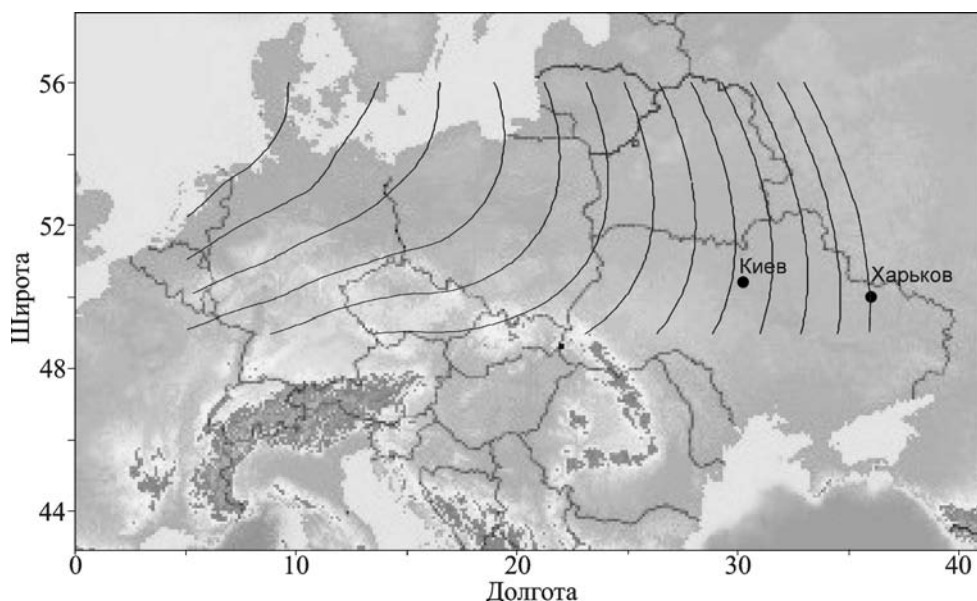


Рис. 4. Изолинии положения минимума атмосферного давления с 18 по 20 января 2007 г.

С помощью полученных оценок горизонтальной  $V_x$  скорости движения фронтальной зоны можно определить ее протяженность (горизонтальную проекцию  $L_x \sim V_x \tau$ ) и угол наклона ( $\text{tg } \alpha \sim H/L_x$ ) (см. таблицу). Жирным шрифтом выделены наиболее вероятные значения скорости и угла наклона. Полученные геометрические параметры, описывающие принятую модель фронта, согласуются с данными для холодных фронтов [14-16]. Приведенные значения угла наклона фронтальной поверхности одного порядка с теоретической оценкой угла

$\alpha \approx 1.1^\circ$ , рассчитанной по известной в метеорологии формуле Маргулиса [15, 16]:

$$\text{tg } \alpha = \frac{l}{g} \frac{v_2 T_1 - v_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \approx \frac{l}{g} T_m \frac{\Delta v}{\Delta T},$$

где  $l = 1.2 \cdot 10^{-4}$ ;  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ ;  $v_1, v_2$  – скорости ветра соответственно в теплой и холодной воздушных массах;  $T_1, T_2$  – температуры воздушных масс;  $T_m = 250 \text{ К}$  – средняя тем-

Таблица. Расчетные параметры фронтальной зоны для нескольких модельных значений высот тропосферы  $H$  и горизонтальных скоростей перемещения фронта для временного сдвига  $\tau = 12 \text{ ч}$

Горизонтальная скорость, м/с	Протяженность фронтальной зоны, км	Угол наклона, градусы		
		$H = 7 \text{ км}$	$H = 8 \text{ км}$	$H = 9 \text{ км}$
9	388.8	1.03	1.18	1.33
<b>10</b>	<b>432.0</b>	<b>0.93</b>	<b>1.06</b>	1.19
<b>11</b>	<b>475.2</b>	<b>0.84</b>	<b>0.96</b>	1.09
<b>12</b>	<b>518.4</b>	<b>0.77</b>	<b>0.88</b>	0.99
13	561.6	0.71	0.82	0.92

пература воздуха;  $\Delta v \approx 2$  м/с и  $\Delta T \approx 3.2$  °С – разности скоростей ветра и температур.

Циклон “Кирилл” был очень мощным погодным образованием, и это позволило предположить, что фронтальная поверхность достигла границ тропопаузы. Для менее мощных циклонов высота фронта может быть меньше, следовательно, оценки вертикальной скорости по используемой в работе методике могут давать существенные погрешности. Тем не менее, поскольку прямые измерения вертикальной скорости движения атмосферных масс во фронтальной области крайне затруднительны, такие опосредованные оценки имеют важное значение для построения моделей циклонических фронтов. В рамках этой же упрощенной модели можно решить обратную задачу – определить высоту развития циклона. Алгоритм решения этой задачи следующий: необходимо постулировать, что угол наклона фронтальной зоны к поверхности земли не зависит от высоты, и по величине наблюдаемой задержки между минимумом давления и максимумом потока мюонов получить оценку высоты верхней границы циклонического фронта. Например, при угле наклона фронтальной зоны  $1.1^\circ$ , полученном по формуле Маргулиса [16], и скорости перемещения фронта 35 км/ч расчетная высота циклона порядка 8.1 км.

## 5. Заключение

Совместные наблюдения вариаций потока мюонов и давления в НЧО Радионавигационного института НАН Украины позволяют получать новую информацию о динамике тропосферных событий. Многолетние ряды синхронных наблюдений вариаций потока мюонов и атмосферных параметров позволили установить надежную связь между мощными погодными возмущениями и изменениями интенсивности потока мюонов. В частности, установлена значимая антикорреляция вариаций КЛ и приземного давления, а также обнаружена большая временная задержка между этими процессами.

Величина задержки, полученная на примере мощного урагана “Кирилл” в рамках упрощенной модели циклона, позволила определить вертикальную скорость перемещения фронтальной зоны и, совместно с результатами

анализа давления в пространственно разнесенных пунктах, оценить геометрические размеры фронтальной структуры. Результаты измерения задержки вариаций потока мюонов могут быть также полезными для оценки скорости распространения погодных возмущений на ионосферные высоты.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить доцента В. Войтенко (ВНУ им. В. Даля) за разработку мюонного детектора и помощь в его установке в НЧО РИ НАНУ, а также Е. Занимонского (РИ НАНУ) за помощь в обработке данных ГНСС наблюдений. Мы признательны персоналу НЧО РИ НАНУ за обеспечение непрерывных многолетних метеорологических наблюдений и регистраций КЛ, а также А. Колоскову и А. Кашееву (РИ НАНУ) за существенный вклад в создание автоматизированной системы сбора и архивирования геофизических данных в НЧО. Авторы признательны А. Г. Боеву за ряд конструктивных замечаний.

## Литература

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. Мюонная диагностика атмосферы и магнитосферы Земли // Изв. РАН. Сер. физ. – 2007. – Т. 71, №7. – С. 1069-1071.
2. Borog V. V., Belonosova O. V., Davydov A. S., Kruchenitskii G. M., Perov S. P., and Yanke V. G. Study of Atmospheric Temperature at Different Altitudes Using Muon Angular Distribution at Sea Level // Proc. 29th International Cosmic Ray Conference. – Pune (India). – 2005. – Vol. 2. – P. 381-384.
3. Дорман Л. И. Вариации космических лучей и исследование космоса. – М.: Изд. АН СССР, 1963. – 1027 с.
4. Сопин А. О., Войтенко В. П. Моделювання сигналів сцинтиляційних детекторів для дослідження просторових атмосферних варіацій потоку мюонів вторинного космічного випромінювання // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – №6Е: <<http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Vsunud/2009-6E/09saovkv.htm>>
5. Fink A. H., Brücher T., Ermert V., Krüger A., and Pinto J. G. The European storm Kyrill in January 2007: synoptic evolution, meteorological impacts and some considerations with respect to climate change //

- Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2009. – Vol.9, No. 2. – P.405-423.
6. Занимонский Е. М., Зализовский А. В., Лисаченко В. Н., Сопин А. А., Ямпольский Ю. М. Ионосферные возмущения над Европой, стимулированные мощным атмосферным фронтом // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, №2. – С. 164-170.
  7. Augusto C. R. A., Navia C. E., and Robba M. B. Search for muon enhancement at sea level from transient solar activity // Phys. Rev. D. – 2005. – Vol. 71, Is. 10, 103011(10 pp.).
  8. Puzovic J., Dragic A., Udovicic V., Jokovic D., Banjanac R., Anicin I. Analysis of Continuous Cosmic-Ray Measurements in Belgrade // Proc. 28th International Cosmic Ray Conference. – 2003. – Trukuba (Japan) – P. 1199.
  9. Дорман Л. И., Фейнберг Е. Л. Вариации космических лучей // Успехи физических наук. – 1956. – Т. LIX, вып. 2. – С. 191-227.
  10. Jacklyn R. M. The barometer coefficient and air mass effects on cosmic rays at Macquarie Island // Aust. J. Phys. – 1954. – Vol. 7, No. 2. – P. 315-321.
  11. Lindholm F. Atmospheric effects on cosmic radiation, air-mass absorption and meson decay // Tellus. – February 1950. – Vol. 2, Is. 1. – P. 63-67.
  12. Thierry L. H. Gregorius and Geoffrey Blewitt. Modeling weather fronts to improve GPS heights: A new tool for GPS meteorology // J. Geophys. Res. – 1999. – Vol. 104, No. B7. – P. 15,261-15,279.
  13. Aplin K. L., Harrison R. G., and Bennett A. J. Effect of the troposphere on surface neutron counter measurements // Adv. Space Res. – 2005. – Vol. 35, No. 8. – P. 1484-1491.
  14. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы: учебник. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
  15. Хромов С. П. Метеорология и климатология для географических факультетов. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 499 с.
  16. Дашко Н. А. Курс лекций по синоптической метеорологии. – Владивосток: ДВГУ, 2005. Гл. 11. – С. 1-55. <[www.dvgu.ru/meteo/book/Synoptic/Glava\\_11.pdf](http://www.dvgu.ru/meteo/book/Synoptic/Glava_11.pdf)>.

## **Визначення параметрів холодного фронту циклона “Кирилл” за синхронними вимірюваннями тиску та потоку мюонів**

**А. О. Сопін, Ю. М. Ямпольський**

Надаються результати спільного аналізу варіацій приземного тиску та потоку мюонів під час проходження над Європою урагану “Кирилл”, реєстрованих у моніторинговому режимі в низькочастотній обсерваторії Радиоастрономічного інституту НАН України. Виявлено та пояснено часовий зсув між цими процесами. У рамках загальноприйнятої моделі холодного циклонічного фронту визначено його просторово-часові параметри, зокрема, кут нахилу і горизонтальну довжину. Результати узгоджуються з відомими даними.

## **Determination of Parameters of a Cold Front of the Cyclone Kyrill from Synchronous Measurements of Atmospheric Pressure and Muon Flux**

**A. O. Sopin and Y. M. Yampolski**

Results are presented of joint analysis of variations in the surface pressure and muon flux observed at the Low Frequency Observatory of the Institute of Radio Astronomy NAS-Ukraine during the passage of the Kyrill storm over Europe. A time lag between the processes has been found and explained. The commonly accepted model of a cold cyclonic front is used to estimate space and time characteristics of the cyclonic front, specifically, the slope angle and horizontal dimension. The results are in good agreement with the characteristic parameters for cold fronts known from the literature.