

Исследование влияния метеорологических параметров на поток космических мюонов с использованием метода эффективного уровня генерации на основе данных детектора DANSS

И. Г. Алексеев^{a,b}, В. В. Белов^d, М. В. Данилов^b, И. В. Житников^d, Д. Р. Зинатулина^{d,f}, С. В. Казарцев^d, А. С. Кобякин^{a,b,c}, А. С. Кузнецов^d, И. В. Мачихильян^g, Д. В. Медведев^d, В. М. Нестеров^a, Д. В. Пономарев^d, И. Е. Розова^d, Н. С. Румянцева^{d,e}, В. Ю. Русинов^a, Э. И. Самигуллин^{a,b,1)}, Д. Н. Свирида^{a,b}, Н. А. Скрובהва^{a,b}, Е. И. Тарковский^a, Д. В. Филосовов^d, М. В. Фомина^d, Е. А. Шевчик^d, М. В. Ширченко^d, Ю. А. Шитов^d, А. Е. Яковлева^b, Е. А. Якушев^d

^aНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, 123182 Москва, Россия

^bФизический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия

^cМосковский физико-технический институт, 141701 Долгопрудный, Россия

^dОбъединенный институт ядерных исследований, 141980 Дубна, Россия

^eГосударственный университет “Дубна”, 141982 Дубна, Россия

^fВоронежский государственный университет, 394018 Воронеж, Россия

^gФедеральное государственное унитарное предприятие

“Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова”,
127055 Москва, Россия

Поступила в редакцию 4 июля 2023 г.

После переработки 4 июля 2023 г.

Принята к публикации 6 июля 2023 г.

Детектор DANSS располагается непосредственно под энергетическим ядерным реактором на Калининской АЭС. Такое положение обеспечивает защиту от космических лучей на уровне ~ 50 м.в.э. в вертикальном направлении и позволяет детектору занять промежуточное положение между наземными и подземными экспериментами по степени экранирования от космических лучей. Чувствительный объем детектора состоит из 1 м^3 пластикового сцинтиллятора, а также окружен многослойной пассивной защитой и мюонным вето. Главной задачей эксперимента DANSS является исследование спектра антинейтрино на различных расстояниях от источника. Для этого детектор помещен на подъемную платформу, с помощью которой данные набираются в трех положениях: в 10.9, 11.9, 12.9 м от центра реактора. Детектор способен восстанавливать мюонные треки, проходящие через чувствительный объем. В настоящей работе были определены значения барометрического, температурного и высотного коэффициентов для мюонов в различных областях зенитного угла θ в рамках метода эффективного уровня генерации. Результаты основываются на мюонных данных, набранных на протяжении четырех лет.

DOI: 10.31857/S123456782315003X, EDN: hwoixw

1. Введение. Зависимость потоков космических лучей от изменений атмосферного давления и температуры была известна еще в 1920-х гг., и практически сразу стало ясно, что характер и величина этих эффектов зависят от степени защиты детектора от космических лучей. Это происходит из-за того, что полные температурный и барометрический эффекты на самом деле складываются из нескольких явлений, которые по разному влияют на мюо-

ны разных энергий. Например, при увеличении температуры воздуха атмосфера расширяется, а значит, растет средняя высота, на которой образуются мюоны. Это очень слабо влияет на мюоны высоких энергий, но мягкие мюоны могут и не пролететь это дополнительное расстояние – этот процесс называется отрицательным температурным эффектом. С другой стороны, при тепловом расширении атмосферы она становится более разреженной, и вероятность заряженных пи-мезонов из адронной компоненты космических лучей провзаимодействовать с

¹⁾e-mail: e.samigullin@lebedev.ru

атомами атмосферы снижается, а значит, увеличивается их вероятность распасться на лету на мюон, что ведет к увеличению потока мюонов, и это называется положительным температурным эффектом. Положительный эффект влияет на мюоны всех энергий, но в низкоэнергетической части мюонного спектра гораздо слабее отрицательного температурного эффекта, поэтому детекторы, расположенные на поверхности, наблюдают главным образом отрицательный эффект, так как большая часть детектируемых мюонов обладает малой энергией. Если же поместить детектор глубоко под землю, то мюоны низких энергий перестанут долетать до детектора, а значит будет наблюдаться по большей части положительный температурный эффект. Большинство экспериментов, изучавших подобные метеорологические эффекты, находились либо на поверхности земли, либо глубоко под землей, в то время как детектор DANSS находится в очень интересном промежуточном положении – на поверхности земли, но при этом ~ 50 м.в.э. вещества над детектором служат защитой от космических лучей в вертикальном направлении. Исследование этих эффектов необходимо для учета изменений фоновых условий, связанных с мюонами в низкофоновых экспериментах, посвященных изучению нейтрино или поиску темной материи, а также при исследовании космических лучей и гелиосферы. Теория, описывающая барометрический эффект, устоялась уже достаточно давно [1], но для описания полного температурного эффекта было разработано несколько подходов. В работе [2], посвященной исследованию подобных метеорологических эффектов с помощью детектора DANSS, использовался метод эффективной температуры [3]. В этом подходе предполагается, что температура атмосферы не зависит от высоты над уровнем земли и равняется некоторой эффективной температуре. Тогда изменение потока мюонов описывается следующей формулой:

$$\frac{I - \langle I \rangle}{\langle I \rangle} = \alpha \frac{T_{\text{эфф}} - \langle T_{\text{эфф}} \rangle}{\langle T_{\text{эфф}} \rangle} + \beta (P - \langle P \rangle), \quad (1)$$

где I – счет мюонов за единицу времени, $T_{\text{эфф}}$ – эффективная температура, P – атмосферное давление на уровне земли, а α и β – температурный и барометрические коэффициенты соответственно. Измеренные в данной работе значения β сильно расходятся с теорией, что может быть связано с тем, что эффективная температура и атмосферное давление не являются полностью независимыми величинами, и один эффект искажает другой. К тому же, хотя измеренные значения α и находятся в отличном согласии с теоретическими предсказаниями, но напрямую их можно

сравнивать только с недавно полученными результатами мюонных телескопов, расположенных в Якутске [4] на глубинах 20 и 40 м.в.э., так как все остальные эксперименты, использовавшие данный подход, находятся гораздо глубже под землей.

Для того, чтобы проверить на устойчивость полученные ранее значения барометрического коэффициента β , а также выполнить сравнение с большим числом экспериментов, было решено обработать набранную в [2] статистику и определить корреляционные коэффициенты, используя метод эффективного уровня генерации [5]. Хотя в наше время он считается устаревшим, тем не менее, благодаря своей относительной простоте этот метод широко использовался в XX в. для учета температурных эффектов. К сожалению, результаты, полученные с его помощью, нельзя строго пересчитать в терминах эффективной температуры, и, поэтому, чтобы выполнить сравнение с экспериментами, использовавшими его, необходимо воспользоваться аналогичным подходом. В данном методе предполагается, что все мюоны образуются на одном изобарическом уровне, обычно принимаемым за 100 мбар, и тогда изменение потока мюонов описывается как:

$$\frac{I - \langle I \rangle}{\langle I \rangle} = \beta (P - \langle P \rangle) + \mu' (H_{100} - \langle H_{100} \rangle) + \mu'' (T_{100} - \langle T_{100} \rangle), \quad (2)$$

где H_{100} и T_{100} – высота и температура изобарического слоя 100 мбар, а β , μ' и μ'' – соответствующие корреляционные коэффициенты.

2. Конструкция детектора. Детектор DANSS [6] расположен на Калининской атомной электростанции (57.91° с.ш., 35.06° в.д.), под реактором ВВЭР-1000 на специальном подъемном механизме, который позволяет перемещать детектор в диапазоне 10.9–12.9 м от центра активной зоны реактора. Реактор, его биологическая защита и резервуары с техническими жидкостями обеспечивают примерно шестикратное подавление потока космических мюонов в вертикальном направлении, что эквивалентно ~ 50 м воды. Чувствительный объем детектора занимает пространство 1 м^3 и содержит в себе 2500 пластиковых сцинтилляционных стрипов, уложенных взаимноперпендикулярными слоями. Вокруг регистрирующей области расположена многослойная пассивная защита, состоящая из последовательных слоев: меди (5 см), борированного полиэтилена (8 см), свинца (5 см) и внешнего слоя борированного полиэтилена (8 см). Такая защита обеспечивает хорошее экранирование от нейтронов, гамма-квантов и прочих внешних фонов. Снару-

жи пассивная защита окружена вето счетчиками, составляющими активную защиту детектора.

Каждый индивидуальный стрип размерами $100 \times 4 \times 1$ см, и имеет по 3 канавки, в которых находятся спектросмещающие волокна. Один конец каждого волокна покрыт зеркальной краской, а противоположный конец выходит к фотоприемникам. Стрипы, лежащие в одном направлении, группируются в секции, состоящие из 10 горизонтальных слоев, содержащих по 5 соседних стрипов. Крайние волокна объединяются в каждой секции и выводятся к фотоэлектронным умножителям. Центральное волокно каждого стрипа индивидуально считывается кремниевым фотоумножителем. Все стрипы покрыты белым светоотражающим слоем, обеспечивающим диффузное отражение фотонов. Антинейтрино детектируется по реакции обратного бета-распада, одним из продуктов которого является быстрый нейтрон; в содержащем много водорода детекторе он замедляется до тепловых энергий, для его регистрации в состав покрытия стрипов введена двуокись гадолиния. Несмотря на то, что DANSS создавался для регистрации реакторных антинейтрино, из-за высокого уровня сегментации он обладает достаточно хорошим пространственным разрешением, что дает возможность изучения не только полного потока мюонов, но и мюонов в отдельных угловых диапазонах.

3. Анализ данных. В данной работе использовались мюонные данные, набранные в период с 05.10.2016 по 31.08.2020, что составляет практически 4 года наблюдений. Во избежание влияния краевых эффектов использовались мюоны, проходящие не дальше 40 см от центра чувствительного объема. Анализ проводился независимо для каждого из трех положений детектора на подъемном механизме. Это было сделано из-за того, что наиболее плотные объемы вещества – сам реактор, его защита и бассейны с водой – занимают разный телесный угол в разных положениях детектора, а значит, степень экранирования от космических лучей отличается. Также анализ был независимо проделан для трех угловых диапазонов мюонов, где ожидается максимальное различие в количестве вещества: для около вертикальных мюонов с косинусом зенитного угла $\cos \theta > 0.9$, около горизонтальных с $\cos \theta < 0.36$ и для мюонов, летящих под любыми углами.

Метеорологические данные были взяты из базы данных глобального климатического реанализа ERA5 [7]. Эта база данных собирает измерения, выполненные наземными метеостанциями, данные метеозондов и спутникового сканирования со всего мира, а затем аппроксимирует современной метеоро-

логической моделью для предсказания атмосферных данных в любой точке Земли. Пространственная точность равняется $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, а генерируемые значения усредняются по часовым интервалам. В этом анализе использовались данные об атмосферном давлении на уровне земли и о температуре на 37 различных уровнях давления в диапазоне от 1 до 1000 мбар, рассчитанные для местоположения детектора DANSS (57.9° с.ш., 35.1° в.д.). Индивидуальные ошибки сгенерированных с помощью ERA5 значений температуры были вычислены из сравнения с соответствующими реальными измерениями температуры на уровне 100 мбар [8], проводящимися с помощью зонда на метеостанции в городе Бологое, примерно в 60 км к западу от АЭС, и составили 0.81 К. Аналогично сравнивались данные о давлении ERA5 с информацией из локального погодного архива [9], и неопределенность индивидуального значения давления на уровне земли составила 0.59 мбар. К сожалению, ERA5 не располагает информацией о высоте уровня 100 мбар, необходимой для реализации метода эффективного уровня генерации. Поэтому для расчета высоты слоя атмосферы с давлением в 100 мбар использовалась формула для барометрического нивелирования [10]:

$$\Delta H = 18400 (1 + aT) \lg \left(\frac{p_1}{p_2} \right), \quad (3)$$

где ΔH – выраженная в метрах разность высот, $a = 0.00366 \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент объемного расширения воздуха, а T – температура. Эта формула дает значение разности высот между двумя уровнями давления p_1 и p_2 . Для наилучшего результата дистанция между двумя уровнями давления не должна быть слишком большой, поэтому для вычислений H_{100} сначала по формуле (3) рассчитывались разности высот между ближайшими уровнями давления, взятыми из ERA5, от поверхности земли до 100 мбар, которые затем суммировались для получения H_{100} . В данных расчетах в качестве температуры использовалось среднее арифметическое температур в соседних слоях. Полученные результаты согласуются с предсказаниями Стандартной Атмосферы, в которых уровень 100 мбар соответствует высоте ~ 16 км.

Для получения значений коэффициентов β , μ' и μ'' использовался метод последовательных приближений. Сначала строились три зависимости относительного изменения скорости счета мюонов от абсолютных изменений давления, температуры и высоты. Затем каждая из зависимостей фитировалась прямой, угловые коэффициенты которых и есть

предварительные значения корреляционных коэффициентов. Однако эти коэффициенты сильно отличаются от реальных, так как каждая из зависимостей, с помощью которых они были получены, сильно размыта двумя другими эффектами. Чтобы уменьшить их влияние, из каждой точки исходных распределений вычиталось влияние двух других эффектов, с использованием вычисленных на предыдущем шаге соответствующих коэффициентов, а затем из полученных распределений опять вычислялись новые коэффициенты. Эта процедура продолжалась, пока модуль разности β между последними итерациями не стал меньше статистической ошибки вычисленного ранее в терминах метода эффективной температуры значения β . Пример итоговых зависимостей для летящих под любыми углами мюонов в нижнем положении детектора после процедуры “очистки” показан на рис. 1. Полученные значения коэффициентов β , μ' и μ'' представлены в табл. 1.

4. Сравнение результатов с другими экспериментами. Как обсуждалось выше, значения коэффициентов зависят от степени защищенности детектора от космических лучей. Величина, характеризующая ее, – это пороговая энергия мюона E_{thr} – энергия, которой должен обладать мюон для того, чтобы пройти через защиту и достигнуть детектора. Кроме того, коэффициенты отличаются для разных зенитных углов, так как более горизонтально летящим мюонам надо пролететь через большее количество вещества атмосферы, чтобы достигнуть земли. Средние значения косинусов зенитного угла и пороговых энергий, измеренные в трех положениях детектора для трех угловых диапазонов, были рассчитаны в работе [2] и представлены в таблице 1.

Для сравнения настоящих результатов с другими работами были выбраны установки, находящиеся в похожих условиях с детектором DANSS, чтобы коэффициенты можно было сравнивать напрямую. Для отбора подобных экспериментов использовалась база мюонных телескопов Global Muon Detector Network [11], и среди представленных в ней детекторов отбирались удовлетворяющие следующим критериям. Во-первых, очевидно, в эксперименте должен использоваться метод эффективного уровня генерации, иначе с ним нельзя будет сравниться. Во-вторых, детектор не должен располагаться высоко в горах, потому что на большой высоте глубина атмосферы, а значит и сами метеорологические эффекты сильно отличаются от наблюдаемых на уровне моря. В-третьих, отбрасывались детекторы, располагающиеся на поверхности без серьезной защиты от космических лучей над ними, потому что в областях

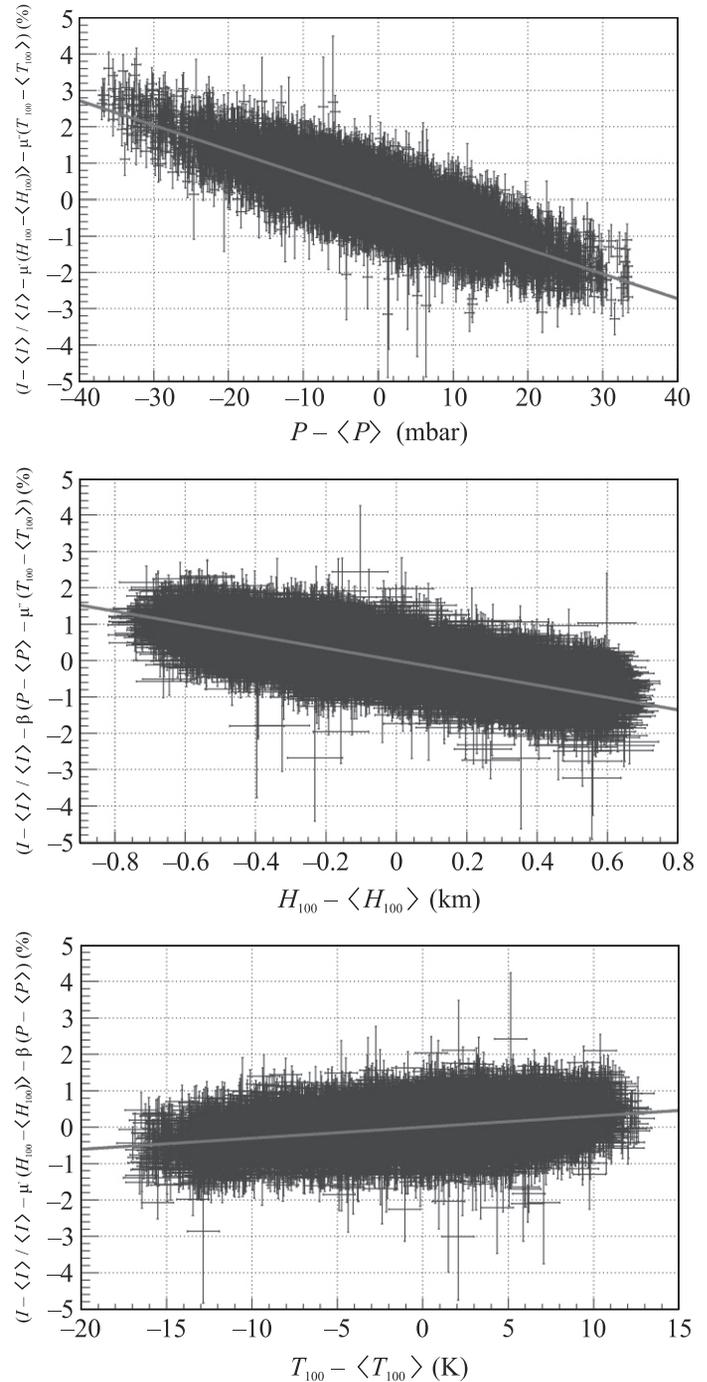


Рис. 1. (Цветной онлайн) Рисунок, иллюстрирующий проведенный анализ для расчета β , μ' и μ'' для нижнего положения детектора и мюонов, летящих с любых направлений. На рисунках показаны “очищенные” эффекты – на верхней изображен барометрический, на средней высотный, а на нижней – температурный

малых E_{thr} коэффициенты будут сильно отличаться от измеренных в этой работе. К сожалению, большая часть отобранных экспериментов для выраже-

Таблица 1. Итоговые результаты вычисления барометрического, температурного и высотного корреляционных коэффициентов, полученных в терминах метода эффективного уровня генерации, а также параметров окружающего вещества для трех положений детектора, в трех угловых диапазонах

Угловой диапазон	Положение детектора	Корреляционный коэффициент	Экспериментальное значение	$\langle E_{thr} \rangle$ (ГэВ)	$\langle \cos \theta \rangle$
Полный поток	Верхнее	β (%/мбар)	-0.0668 ± 0.004 (стат.)	12.8 ± 1.7	0.656 ± 0.007
		μ' (%/км)	-1.61 ± 0.02 (стат.)		
		μ'' (%/K)	0.0286 ± 0.0008 (стат.)		
	Среднее	β (%/мбар)	-0.0665 ± 0.0006 (стат.)	12.5 ± 1.7	0.654 ± 0.008
		μ' (%/км)	-1.53 ± 0.02 (стат.)		
		μ'' (%/K)	0.0257 ± 0.001 (стат.)		
Нижнее	β (%/мбар)	-0.0680 ± 0.0004 (стат.)	12.2 ± 1.7	0.655 ± 0.008	
	μ' (%/км)	-1.70 ± 0.01 (стат.)			
	μ'' (%/K)	0.0304 ± 0.0007 (стат.)			
Вертикальные	Верхнее	β (%/мбар)	-0.055 ± 0.001 (стат.)	10.9 ± 0.7	0.950 ± 0.002
		μ' (%/км)	-0.72 ± 0.035 (стат.)		
		μ'' (%/K)	0.030 ± 0.002 (стат.)		
	Среднее	β (%/мбар)	-0.054 ± 0.001 (стат.)	11.0 ± 0.7	0.951 ± 0.002
		μ' (%/км)	-0.62 ± 0.06 (стат.)		
		μ'' (%/K)	0.040 ± 0.003 (стат.)		
Нижнее	β (%/мбар)	-0.0565 ± 0.0009 (стат.)	11.1 ± 0.7	0.952 ± 0.002	
	μ' (%/км)	-0.62 ± 0.03 (стат.)			
	μ'' (%/K)	0.035 ± 0.002 (стат.)			
Горизонтальные	Верхнее	β (%/мбар)	-0.094 ± 0.001 (стат.)	17.1 ± 4.4	0.269 ± 0.002
		μ' (%/км)	-3.07 ± 0.04 (стат.)		
		μ'' (%/K)	-0.001 ± 0.002 (стат.)		
	Среднее	β (%/мбар)	-0.089 ± 0.002 (стат.)	17.0 ± 4.4	0.268 ± 0.002
		μ' (%/км)	-3.11 ± 0.07 (стат.)		
		μ'' (%/K)	-0.002 ± 0.004 (стат.)		
Нижнее	β (%/мбар)	-0.093 ± 0.001 (стат.)	16.9 ± 4.5	0.265 ± 0.002	
	μ' (%/км)	-3.07 ± 0.04 (стат.)			
	μ'' (%/K)	0.0005 ± 0.0022 (стат.)			

ния защищенности от космических лучей использует не пороговую энергию в явном виде, а количество воды, эквивалентное веществу над ними. Эти значения равняются 40 м.в.э. для Budapest [12], 42 м.в.э. для Hobart [13] и 60 м.в.э. для London [14], и эти значения требуется пересчитать в пороговые энергии. Для этого из Particle Data Group [15] были взяты значения средних энергетических потерь мюонов в воде, соответствующие 24 значениям энергии мюона в интервале от 10 МэВ до 40 ГэВ. Затем решалась задача, обращенная во времени, – сколько энергии получит мюон с энергией 10 МэВ, пролетев через 40, 42 и 60 м воды, в предположении, что он получает энергию, проходя через вещество, а не тратит. Для этого заданные пути разбивались на миллиметровые шаги, внутри которых считалось, что энергетические поте-

ри мюона постоянны, и вычислялись в приближении, что эти потери линейно меняются между соседними точками, выбранными ранее.

Сравнение полученных коэффициентов μ' и μ'' с результатами детекторов, находящихся в похожих условиях, представлены на рис. 2. Результаты, полученные для около горизонтальных мюонов и в меньшей степени для всех углов, расходятся с другими экспериментами. Это обусловлено тем, что все эти детекторы являются мюонными телескопами, направленными вверх, и их нельзя напрямую сравнивать. Полученные же значения для около вертикальных мюонов находятся в достаточно неплохом согласии с результатами других экспериментов.

Сравнение полученных значений β с теоретическими предсказаниями [1] и другими эксперимента-

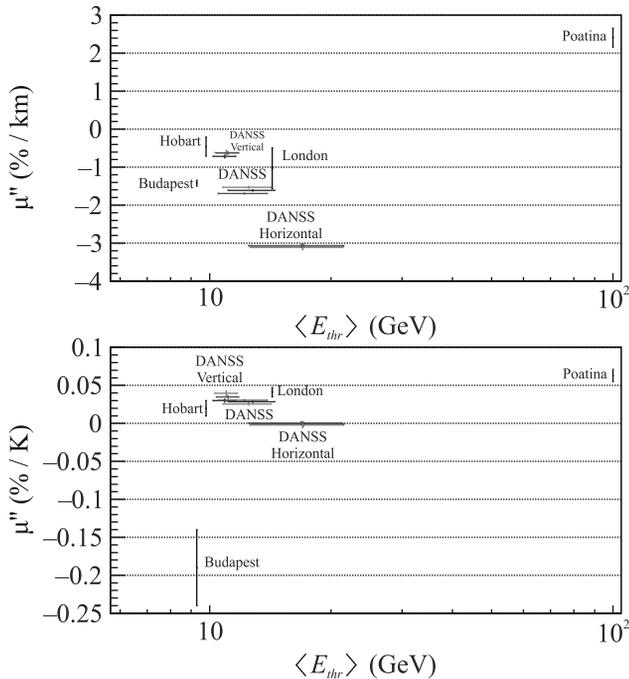


Рис. 2. (Цветной онлайн) Сравнение полученных в данной работе значений коэффициентов μ' (верхний рисунок) и μ'' (нижний рисунок) с результатами других подземных экспериментов: London [14], Budapest [12], Hobart [13] и Poatina [16]. Цветами обозначены точки, соответствующие результатам, полученным в разных положениях детектора: красным цветом – в нижнем положении, зеленым – в среднем и синем – в верхнем. Подписи соответствуют результатам, набранным в разных угловых диапазонах, – DANSS Vertical – для около вертикальных мюонов ($\cos \theta > 0.9$), DANSS – для всех углов, а DANSS Horizontal – для около горизонтальных мюонов ($\cos \theta < 0.36$)

ми показано на рис. 3. Из-за того, что теоретическая зависимость β от E_{thr} достаточно сложна, основная часть рис. 3, включающая в себя теоретические кривые и результаты других экспериментов, взята из работы [1], а точки, соответствующие детектору DANSS, нанесены поверх него. Измеренные значения β практически не отличаются от полученных ранее результатов с использованием метода эффективной температуры [2] и также расходятся с теоретическими предсказаниями. Однако, если внимательно сравнить экспериментальные точки на рис. 2 и 3, то можно заметить, что вычисленные в данной работе значения E_{thr} для экспериментов Budapest, Hobart и London заметно больше вычисленных в работе [1]. При этом в работе [14] также метры водного эквивалента переводились в значения пороговой энергии (правда без численного приведения этих значений), и они тоже заметно больше, чем изображены на рис. 3.

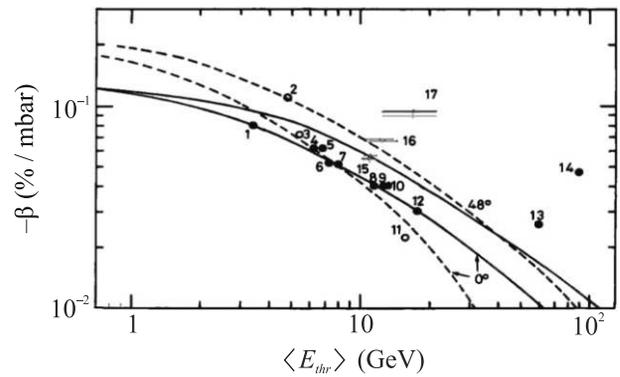


Рис. 3. (Цветной онлайн) Сравнение экспериментально измеренных различными детекторами значений барометрического коэффициента β с предсказаниями модели. Сплошной линией показаны расчеты для $X_0 = 1000 \text{ г/см}^2$, а штрихованной для $X_0 = 600 \text{ г/см}^2$; нижние кривые рассчитывались для $\theta = 0^\circ$, а верхние для $\theta = 48^\circ$. Польные и закрашенные круги показывают экспериментальные станции, расположенные выше и ниже 1 км, соответственно. Результаты этой работы, полученные с использованием метода эффективного уровня генерации, подписаны номерами: 15 – для около вертикальных мюонов, 16 – для всех мюонов, 17 – для практически горизонтальных. Результаты, соответствующие нижнему положению детектора, изображены красными, среднему положению – зелеными и верхнему положению – синими точками. Другие результаты: 1 – Yakutsk (глубина 20 м.в.э.); 2 – Bolivia; 3 – Embudo; 4 – Mawson; 5 – Misato; 6 – Hobart; 7 – Budapest; 8 – Takeyama; 9 – London; 10 – Yakutsk (глубина 60 м.в.э.); 11 – Socoro; 12 – Sakashita; 13 – Matushiro [17] и 14 – Poatina [16]. Ссылки на исследования 1–12 могут быть найдены в [18]

Если же сдвинуть на нем точки 6, 7 и 9, вправо до рассчитанных здесь или в работе [14] значений E_{thr} , то они тоже станут достаточно сильно расходиться с предсказаниями теории.

5. Заключение. В данной работе проводился анализ данных детектора DANSS для исследования метеорологических эффектов, влияющих на поток космических мюонов, с использованием метода эффективного уровня генерации. В результате были получены значения корреляционных коэффициентов β , μ' и μ'' в трех положениях детектора, для трех диапазонов значений зенитного угла. Все полученные значения β практически не отличаются от измеренных ранее с использованием метода эффективной температуры для учета температурного эффекта, и также расходятся с теорией на $\sim 30\%$. При этом коэффициенты μ' и μ'' , измеренные для около вертикальных мюонов, хорошо согласуются с другими экспериментами, находящимися в похожих усло-

виях. Это демонстрирует устойчивость измеренных значений β к методу получения, а также подтверждает правильность полученных ранее с использованием метода эффективной температуры значений α . Так же было обнаружено несоответствие между вычисленными в работах [1] и [14] значениями пороговых энергий для детекторов Budapest, Hobart и London, что, возможно, также указывает на расхождение значений β , полученных в этих экспериментах, с теорией.

Авторы выражают благодарность работникам и руководству Калининской атомной электростанции за постоянную помощь и поддержку на протяжении всего эксперимента. Особой благодарности заслуживают коллективы отдела радиационной безопасности и цеха тепловой автоматики и измерений за содействие при проведении организационных процедур. Данная работа была бы невозможна без участия сотрудников лаборатории физики реакторов, которые обеспечивали эксперимент регулярными данными о состоянии реактора и поддерживали плодотворные обсуждения.

Создание экспериментальной установки ДАНСС стало возможным благодаря поддержке Госкорпорации «РосАтом» в рамках государственных контрактов #Н.4х.44.90.13.1119 и Н.4х.44.9Б.16.1006 (2013–2016 гг.).

Длительная эксплуатация детектора, получение и обработка экспериментальных данных выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда #17-12-01145 (2017–2021 гг.). Настоящий анализ выполнен благодаря гранту Российского научного фонда #23-12-00085.

1. S. Sagisaka, *Il Nuovo Cimento C* **9**, 809 (1986).
2. I. Alekseev, V. Belov, V. Brudanin et al. (Collaboration), *Eur. Phys. J. C* **82**, 515 (2022).

3. P. H. Barrett, L. M. Bollinger, G. Cocconi, Y. Eisenberg, and K. Greisen, *Rev. Mod. Phys.* **24**(3), 133 (1952).
4. M. Berkova, V. Grigoryev, M. Preobrazhensky, A. Zverev, and V. Yanke, *Phys. At. Nucl.* **81**, 776 (2018).
5. A. Duperier, *Proceedings of the Physical Society. Section A* **62**, 684 (1949).
6. I. Alekseev, V. Belov, V. Brudanin et al. (Collaboration), *J. Instrum.* **11**, 06 (2016).
7. <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysisdatasets/era5>.
8. I. Durre, R. Vose, and D. Wuertz, *Journal of Climate – J CLIMATE* **19**, 53 (2006).
9. <http://www.pogodaiklimat.ru>.
10. А. Х. Хргиан, *Физика атмосферы*, Гидрометеорологическое общество, Л. (1969).
11. <http://cr0.izmiran.ru/gmdnet/>.
12. T. Sandor, A. Somogyi, and F. Telbisz, *Il Nuovo Cimento* **23**, 1080 (1962).
13. A. G. Fenton, R. M. Jacklyn, and R. B. Taylor, *Il Nuovo Cimento* **22**, 285 (1961).
14. J. Dutt and T. Thambyahpillai, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **27**(3), 34 (1965).
15. R. L. Workman, V. D. Burkert, V. Crede et al. (Collaboration), *PTEP* **2022**, 083C01 (2022).
16. P. R. A. Lyons, A. G. Fenton, and K. B. Fenton, *Further calculations of atmospheric coefficients for underground cosmic ray detectors*, in *Proceedings of the XVII. International Conference Cosmic Ray*, Paris, France (1981), v. 4, p. 300.
17. S. Yasue, S. Mori, and S. Sagisaka, *Solar and meteorological effects on high energy cosmic rays observed at deep underground (220 hg cm⁻² in depth) at matsushiro*, in *Proceedings of the XVIII International Conference Cosmic Ray*, Bangalore, India (1983), v. 10, p. 237.
18. *Appendix*, in *Proceedings of the International Symposium High Energy Cosmic Ray Modulation*, Tokyo (1976).