

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук

На правах рукописи

Щеголев Олег Борисович

**ИЗУЧЕНИЕ АДРОННОЙ КОМПОНЕНТЫ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ  
ЛИВНЕЙ МЕТОДОМ РЕГИСТРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
Стенькин Юрий Васильевич

МОСКВА – 2016

## Содержание:

<b>Введение</b> .....	<b>4</b>
История исследования ШАЛ .....	4
Установки для изучения ШАЛ .....	5
<b>Глава 1. Электронно-нейтронный детектор и эффективность регистрации нейтронов</b> .....	<b>19</b>
1.1. Сцинтилляторы .....	19
1.2. Конструкция детектора .....	23
1.3. Измерительный стенд для калибровки детектора .....	25
1.4. Сигналы с детектора. Регистрация тепловых нейтронов .....	26
1.5. Регистрация нейтронного фона. Глобальная сеть эн-детекторов .....	32
1.6. Регистрация электромагнитной компоненты ШАЛ и тепловых нейтронов, рождаемых адронами ствола ливня .....	36
<b>Глава 2. Проект PRISMA</b> .....	<b>42</b>
2.1. Идея проекта .....	42
2.2. Установка PRISMA-32 .....	43
2.3. Установка PRISMA-YBJ .....	48
<b>Глава 3. Результаты экспериментов</b> .....	<b>53</b>
3.1. Программы для обработки данных .....	53
3.2. Функции пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ .....	55
3.3. Функции пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ .....	58
3.4. Распределение широких атмосферных ливней по числу нейтронов .....	60
<b>Глава 4. Моделирование экспериментов</b> .....	<b>63</b>
4.1. Общая схема моделирования .....	64
4.2. Моделирование в CORSIKA6.9 .....	66
4.2.1. Модели .....	67
4.2.2. Энергетические диапазоны и количество ливней .....	67
4.3. Моделирование в GEANT4.10 .....	69
4.3.1. Геометрия .....	69
4.3.2. Модели .....	72
4.4. Результаты моделирования .....	73
4.4.1. Зависимость энерговыделения в детекторах установок от энергии заряженных частиц и гамма-квантов .....	73
4.4.2. Зависимость числа зарегистрированных нейтронов от энергии «родительских» адронов .....	77
4.4.3. Функция пространственного распределения зарегистрированных нейтронов относительно «родительских» адронов .....	80
4.4.4. Сравнение программ обработки результатов измерений .....	83
4.4.5. Функция пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ .....	88
4.4.6. Распределения ШАЛ по числу нейтронов .....	91
<b>Глава 5. Исследования фона</b> .....	<b>93</b>

<b>5.1. Исследование сезонных вариаций фона тепловых нейтронов в Москве...</b>	<b>95</b>
<b>5.2. Исследование сезонных вариаций фона тепловых нейтронов на Тибете..</b>	<b>97</b>
<b>5.3. Другие вариации фона. ....</b>	<b>100</b>
5.3.1. Суточные волны. ....	100
5.3.2. Лунные волны. ....	101
5.3.2. Вариации фона нейтронов во время гроз. ....	103
<b>Заключение .....</b>	<b>106</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>110</b>

Введение.

### ***История исследования ШАЛ.***

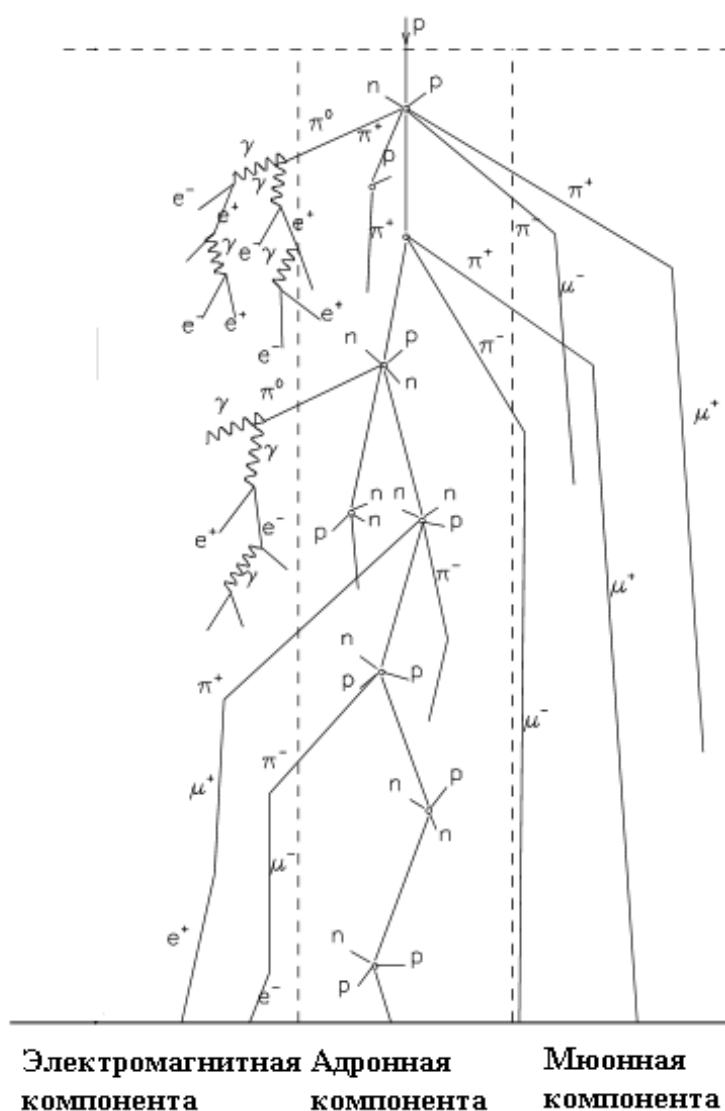
Началом исследования широких атмосферных ливней принято считать работы Скобельцына, выполненные в 1929 году при помощи камеры Вильсона в магнитном поле [1] и работы Оже 1938 года [2] с использованием разнесенных на плоскости счетчиков Гейгера-Мюллера, включенных в схему совпадений. Скобельцын обнаружил существование генетически связанных групп заряженных частиц космических лучей, а Оже обнаружил совпадения в детекторах, разнесенных на расстояния вплоть до нескольких сотен метров.

Первые предположения о природе широких атмосферных ливней были высказаны в работах Эйлера [3]. На основании разработанной Ландау и Румером лавинной теории для электронов и фотонов высокой энергии и приложения её к анализу экспериментальных данных [4], Эйлер сделал предположение о том, что ШАЛ является электромагнитным каскадом. В свою очередь в 1948 году Г. Т. Зацепиным [5] было предложено рассмотрение ШАЛ, как ядерного каскада, что позволило объяснить противоречия в накопленных к тому времени экспериментальных данных, и впоследствии нашло свое подтверждение. То есть, развитие широкого атмосферного ливня происходит на основе ядерного каскада, который в свою очередь через распады  $\pi^0$  создает

электромагнитные субкаскады, а распады заряженных пионов и каонов дают мюонную компоненту [6].

### ***Установки для изучения ШАЛ.***

В широком атмосферном ливне присутствуют электромагнитная, мюонная и адронная компоненты. Структура ШАЛ схематично показана на рис. 1.



*Рис. 1. Структура ШАЛ.*

А на рис. 2 показаны глубины атмосферы, на которых достигают максимума ливни с различной первичной энергией.

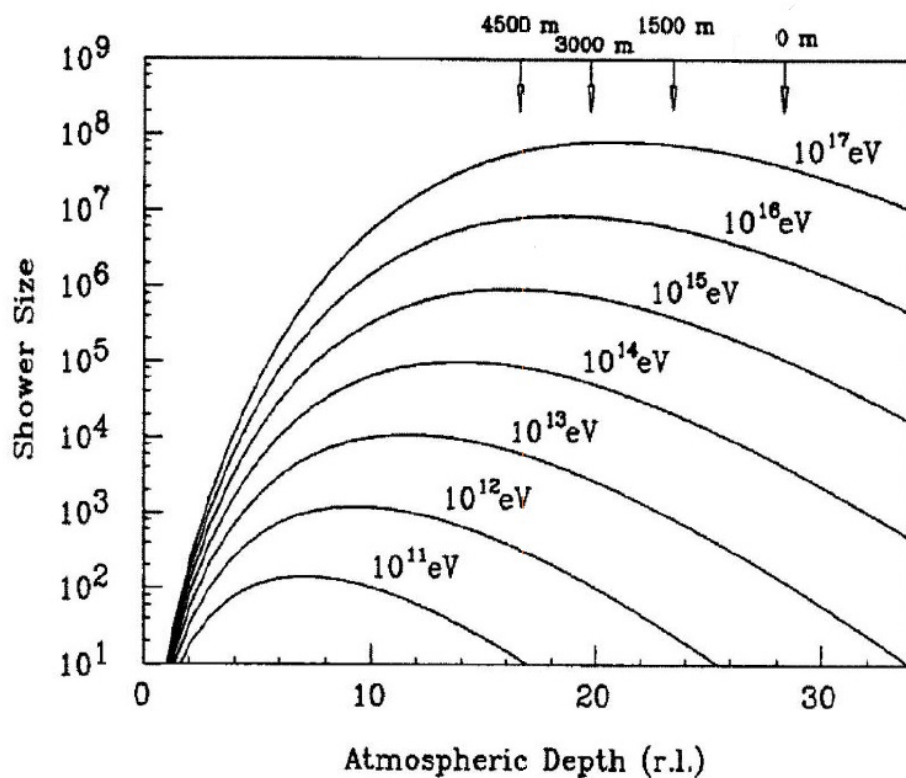


Рис. 2. Высоты максимумов развития ливней для вертикальных ливней различных энергий.

Электромагнитная компонента ливня является наибольшей по числу частиц и превышает все остальные примерно на два порядка. Следовательно, обычные гейгеровские, сцинтилляционные или водные черенковские детекторы, расположенные на поверхности, регистрируют в основном эту компоненту. Большая часть установок, созданных для изучения ШАЛ, измеряет прежде всего электромагнитную компоненту. В качестве примера таких установок можно назвать ШАЛ МГУ в Москве (на которой было сделано открытие так называемого «излома» или «колена» в спектре космических лучей [7]), Ковер на Баксане, Якутскую установку,

МАКЕТ-ANI в Армении, ШАЛ на Тянь-Шане, EAS-TOP в Италии, KASCADE и KASCADE-Grande в Карлсруэ, Tibet-AS $\gamma$  и ARGO-YBJ на Тибете, IceTop в Антарктиде, AGASA в Японии, Telescope Array в США и др. Отдельно здесь можно упомянуть установку Тунка (-25, -133, HiScore) в Тункинской долине (Прибайкалье), в которой электромагнитная компонента ШАЛ регистрируется через создаваемое ей черенковское излучение в атмосфере.

Многие из перечисленных установок также регистрируют мюонную компоненту. Для отбора мюонных событий используются детекторы, защищенные достаточной для поглощения электронов и гамма-квантов толщиной вещества. В основном это либо подземные детекторы, либо детекторы под толстым слоем поглотителя (например, железа), либо водные черенковские детекторы большого объема.

Значительно хуже дело обстоит с адронной компонентой. Для её изучения применялись рентгеновские пленки и ядерные эмульсии в экспериментах на Чакалтайе и Памире [8], ионизационные калориметры [9, 10], нейтронные мониторы [9, 11, 12]. Данные о некоторых установках по исследованию ШАЛ приведены в табл.1. Данные об адронных калориметрах, использовавшихся для изучения ШАЛ приведены в табл.2.

Табл.1. Установки для регистрации ШАЛ.

Название	Место	Г	детекторы различных компонент ШАЛ					$\Delta E_0$ , эВ	S, м <sup>2</sup>	h, м над уровнем моря
			e- $\gamma$	$\mu$	h	FT	FT			
ШАЛ МГУ	Москва	1959-1990	+	+	-	-	-	$5 \cdot 10^5$	150	
Якутск	Якутия	с 1973	+	+	+	-	-	$10^{17}$ - $10^{20}$	110	
TA	Юга, США	с 2008	+	-	-	<b>3</b>	-	$10^{18}$ - $10^{21}$	1400	
Auger	Аргентина	с 2003	+	-	-	<b>4</b>	-	$10^{18}$ - $10^{21}$	1400	
KASCADE & KASCADE-Grande	Карлсруэ, Германия	1996-2009	+	+	+	-	-	$10^{14}$ - $10^{18}$	110	
PRISMA-32	Москва	с 2012	+	-	+	-	-	$7 \cdot 10^{14}$ - $10^{16}$	170	
PRISMA-YBJ	Тибет, Китай	с 2013	+	-	+	-	-	$3 \cdot 10^{14}$ - $10^{16}$	4300	
EAS-TOPO	LINGS, Италия	1989-1999	+	+	+	-	-	$10^{13}$ - $10^{17}$	2000	
Tibet-AS $\gamma$	Тибет, Китай	1996-1999	+	+	-	-	-	$3 \cdot 10^{12}$ - $10^{17}$	4300	
ARGO-YBJ	Тибет, Китай	2002-2013	+	-	-	-	-	$10^{11}$ - $10^{16}$	4300	
Ice Top	Антарктида	с 2010	+	+	-	-	-	$3 \cdot 10^{14}$ - $10^{18}$	2835	
Ковер & Ковер-2	Баксан	с 1973	+	+	+	-	-	$10^{13}$ - $10^{16}$	1700	
HEGRA	Канарские о.	1995-2002	+	-	-	-	-	$10^{12}$ - $10^{16}$	2240	
Тянь-Шань	Казахстан	1963-1986	+	+	+	-	-	$10^{13}$ - $10^{16}$	3340	
AGASA	Япония	1990	+	-	-	-	-	$10^{18}$ - $3 \cdot 10^{20}$	900	
Mt. Nonaka	Япония	1966	+	+	+	-	-	$10^{14}$ - $10^{16}$	2770	
Тунка-25 & Тунка-133	Тунгуская долина	с 2000	+	-	-	-	-	$10^{14}$ - $10^{18}$	675	
KGF	Индия	1965-1995	+	+	-	-	-	$10^{14}$ - $10^{16}$	800	
Akeno	Япония	1979	+	+	-	-	-	$3 \cdot 10^{14}$ - $10^{18}$	900	
CASA-MIA & HiRes	США	1992-1997	+	+	-	<b>1</b>	-	$3 \cdot 10^{13}$ - $3 \cdot 10^{16}$	1200	
HiRes	США	1997-2006	-	-	-	<b>2</b>	-	$3 \cdot 10^{17}$ - $10^{20}$	1600	
GRAPES-III	Индия	с 2001	+	+	-	-	-	$3 \cdot 10^{13}$ - $3 \cdot 10^{16}$	2200	



Табл. 2. Ионизационно-адронные калориметры в установках по изучению ШАЛ.

Название установки	Место расположения	Высота (м над уровнем моря)	Площадь (м <sup>2</sup> )	Толщина поглотителя (г/см <sup>2</sup> )	Год создания
ANI-83	гора Арагац (Армения)	3200	10	900	1983
ШАЛ	Тянь-Шань (Казахстан)	3340	36	850	1963
EAS-TOР	LNGS(Италия)	2000	144	820	1986
KASCADE	Карлсруэ (Германия)	110	320	1460	1996

Основной проблемой при изучении адронной компоненты является сложность и дороговизна используемых детекторов, и как следствие их малочисленность по сравнению с обычными ливневыми детекторами. Большая часть установок, регистрирующих ШАЛ, вообще не имеет адронных детекторов. А в тех установках, где такие детекторы есть, их площадь несопоставима с размерами изучаемых ливней и площадью детекторов электромагнитной компоненты (не больше нескольких сотен квадратных метров). Также можно упомянуть опробованный в БНО ИЯИ РАН метод регистрации адронов при помощи подземного (500 г/см<sup>2</sup>) мюонного детектора большой непрерывной площади (175 кв. м) по форме пятен (метод подземного однослойного адронного калориметра) [13]. Наиболее современной и значимой из всех предназначенных для регистрации адронов установок автор считает адронный калориметр

установки KASCADE. Данный калориметр имеет относительно большую площадь в  $320 \text{ м}^2$  (для сравнения, на Тянь-Шане площадь калориметра составляла  $36 \text{ м}^2$ ) и при этом очень высокую плотность. Также можно добавить, что данный детектор эксплуатировался позже остальных и имел более новые и высокотехнологичные системы электроники и сбора данных. Тем не менее, несмотря на все вышеуказанные достоинства, большинство опубликованных работ, использующих калориметры, касаются так называемых «одиночных» или «unaccompanied hadrons», а опубликованный энергетический спектр этих частиц заканчивается на энергии  $10^{15}$  эВ [14, 15]. Единственные работы коллаборации KASCADE(-Grande), которые автору удалось найти, где опубликован спектр ШАЛ по числу адронов по данным калориметра - это работы [16, 17]. Работа [16] опубликована в 1999 году и статистика, полученная на тот момент, вероятно, была мала. Экспериментальный спектр ШАЛ по числу адронов из работы [16] приведен на рис. 3. Спектр приведен для всех адронов в калориметре, т. е. для пороговой энергии адронов 50 ГэВ. Показатель интегрального спектра  $\beta = -1.8$  соответствует экспериментальным точкам до  $\lg N_h = 1.89$ . Далее авторами предполагается укрупнение спектра до значения  $\beta = 2.2$  (для интегрального спектра, а на рис. 4 приведен дифференциальный, т. е.  $\beta+1$ ). При этом видно, что точки в этой области с большими ошибками.

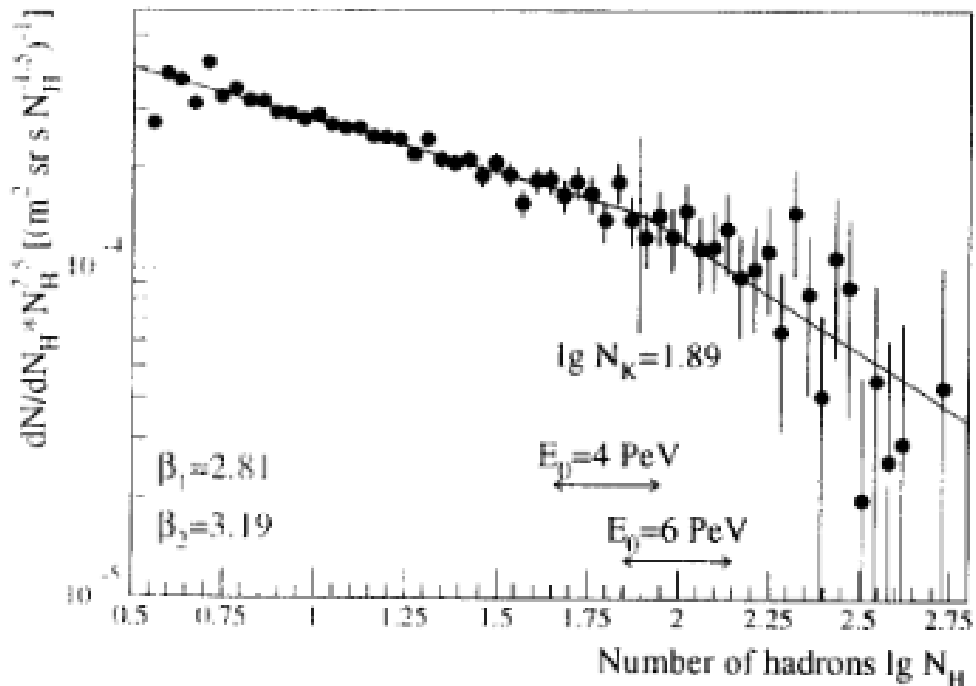
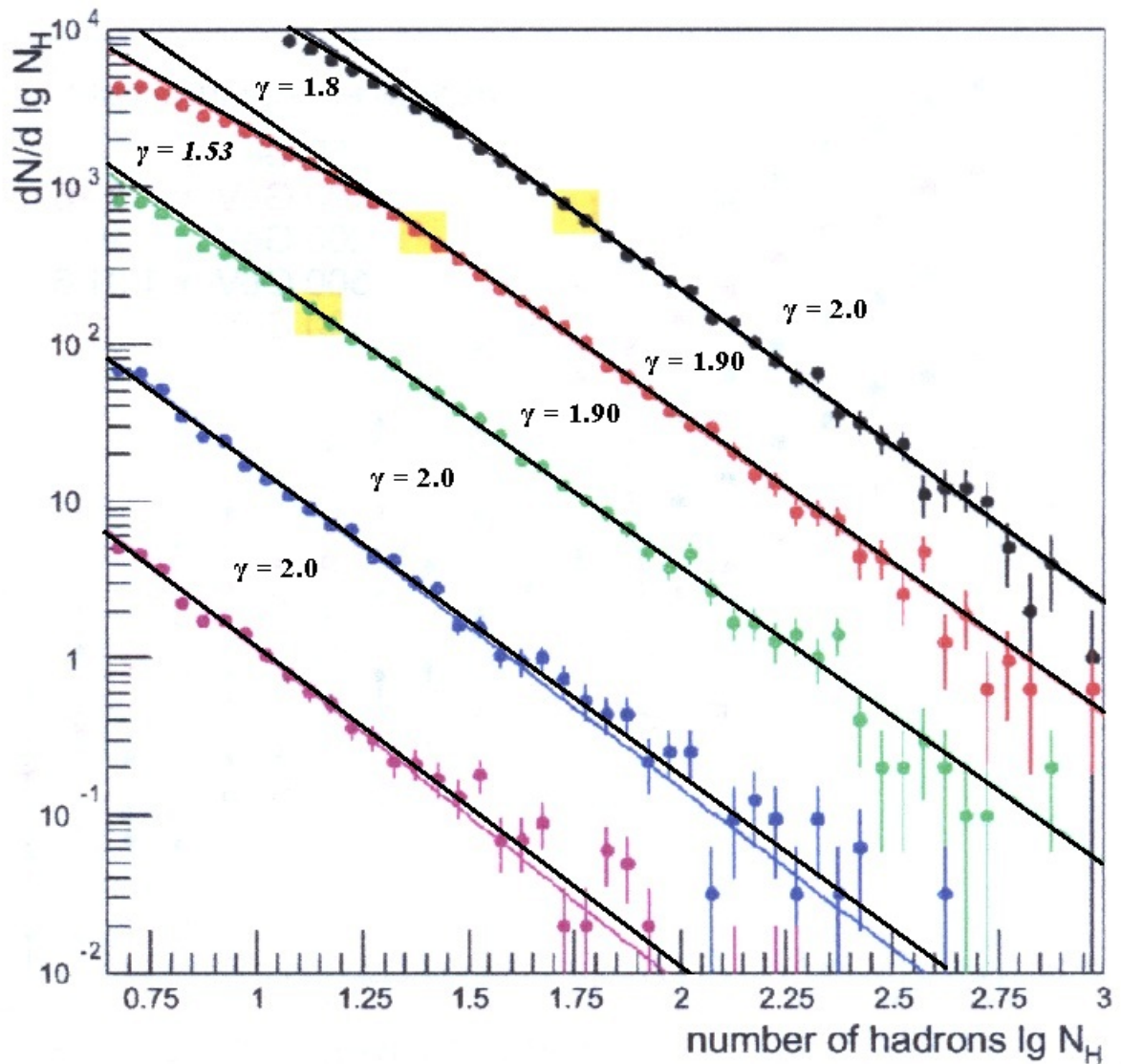


Рис. 3. Спектр ШАЛ по числу адронов полученный экспериментально на калориметре KASCADE и опубликованный в 1999 году [16]. Порог адронов по энергии 50 ГэВ (все адроны в калориметре).

На рис. 4 приведен экспериментально полученный спектр ШАЛ по числу адронов из работы [17], опубликованной также коллаборацией KASCADE, но уже в 2001 году. Видно, что статистика в данном случае намного больше, кроме того данные разделены по пороговой энергии адронов (от 50 ГэВ – черные точки, до 1 ТэВ – фиолетовые точки). Также видно, что предположенного в предыдущей статье излома в области  $\lg N_h = 1.89$  нет, по крайней мере, такой величины ( $\sim 0.4$ ). К сожалению, в статье не были приведены значения наклонов спектров, поэтому мы измерили их самостоятельно, черные линии и подписи черным цветом на этом и

следующем рисунке сделаны автором данной работы. Наклоны спектров лежат в диапазоне  $\beta = 1.9-2.0$ .



*Рис. 4. Спектры ШАЛ по числу адронов, полученные экспериментально на калориметре KASCADE и опубликованные в 2001 году [17]. Закрашенные разными цветами – различные пороги по энергии адронов: от 50 ГэВ до 1 ТэВ.*

На рис. 5 приведены расчетные спектры ШАЛ по числу адронов из этой же работы [17]. Важно отметить, что расчеты были проведены для

спектров ПКЛ с наличием «излома» (открытые точки на рис. 5) и с его отсутствием (закрашенные точки на рис. 5).

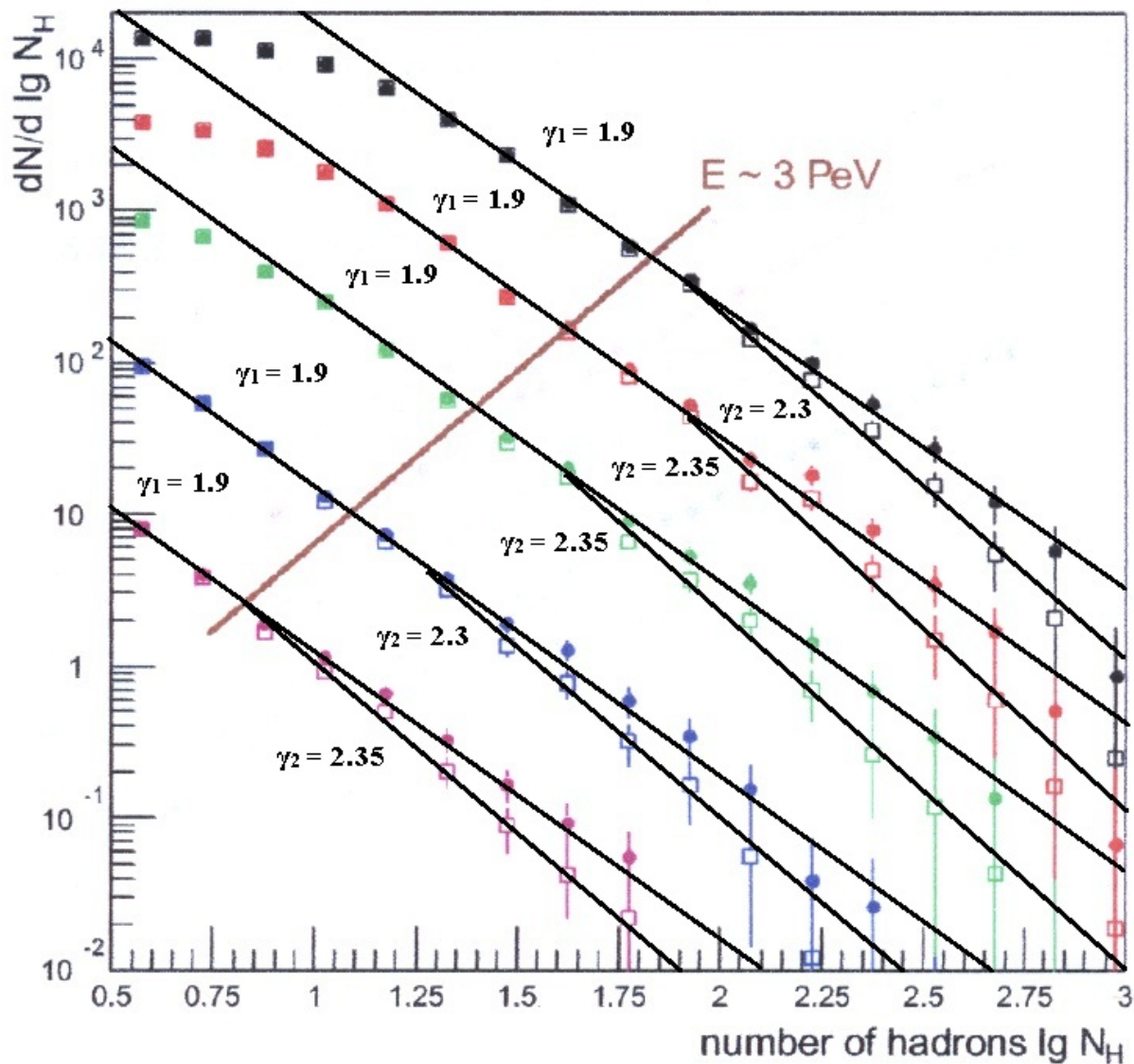


Рис. 5. Спектры ШАЛ по числу адронов, полученные в моделировании в CORSIKA и GEANT для калориметра KASCADE и опубликованные в 2001 году [17]. Закрашенные точки - моделирование спектра ПКЛ без «излома», открытые точки – с «изломом». Разные цвета соответствуют различным порогам по энергии адронов: от 50 ГэВ до 1 ТэВ.

Из рисунков видно, что результаты, полученные в эксперименте, не согласуются с моделированием, проведенным для спектра с «изломом».

При этом они хорошо согласуются с моделированием, проведенным без «излома». Возможно, в связи с этой нестыковкой более поздних публикаций KASCADE на эту тему не было. Таким образом, можно говорить о том, что изучение адронной компоненты ШАЛ остается актуальной и нерешенной задачей, в частности, в области «колена».

Особенно актуальным сегодня является вопрос химического состава космических лучей в диапазоне энергий  $10^{15}$ - $10^{17}$  эВ. В последние годы этот вопрос активно обсуждается на международных конференциях. Соответствующие измерения и расчеты приводят коллаборации KASCADE [18], ТУНКА [19, 20], IceTop [21], Якутск [22].

В 2001 году в работе [23] Ю.В. Стенькиным и J.F. Valdes-Galicia был предложен новый метод изучения адронной компоненты ШАЛ по большой площади ( $\sim 10000$  м<sup>2</sup>) через регистрацию создаваемых адронами вторичных тепловых нейтронов. Ещё начиная с работ Тонджоржи и Коккони в конце 40-х годов [24], было экспериментально показано присутствие нейтронов в широких атмосферных ливнях. В последующем это неоднократно изучалось на нейтронных мониторах и при помощи отдельных борных и гелиевых пропорциональных счетчиков, в частности, на установке на Тянь-Шане [25], где было показано наличие событий с большой множественностью импульсов, зарегистрированных нейтронным монитором и окружающими его счетчиками Гейгера, с миллисекундными задержками относительно фронта ШАЛ. Это было ошибочно

интерпретировано авторами как свидетельство наличия некой «тяжелой запаздывающей компоненты ШАЛ». Происхождение же регистрируемых запаздывающих импульсов объясняется относительно долгим временем замедления и жизни нейтронов в окружающем детекторы веществе, которые создаются там адронами ШАЛ в большом количестве. В данном случае, наибольшим сечением обладает процесс ядерных расщеплений с излучением испарительных нейтронов с энергией  $\sim 10$  МэВ. Рождение происходит в основном в плотных материалах, к примеру, в грунте, в бетоне, в свинце (нейтронный монитор). Далее происходит замедление нейтронов и после этого нейтроны могут регистрироваться детекторами тепловых нейтронов.

Ю.В. Стенькиным была в свое время показана непригодность газовых счетчиков для подобных экспериментов и была предложена и развита методика использования для регистрации нейтронов в ШАЛ сцинтилляционных детекторов на основе неорганического сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag})$  с добавками изотопа  ${}^6\text{Li}$ , а позднее соединений натурального бора. При взаимодействии адронной компоненты ливня с грунтом (на открытой местности) или бетоном (в здании) рождаются испарительные нейтроны с энергией порядка несколько МэВ, которые впоследствии замедляются (в основном также в грунте и бетоне, поскольку воздух плохой замедлитель) и затем регистрируются детектором. Эффективность регистрации тепловых нейтронов таким детектором при толщине всего

лишь  $30 \text{ мг/см}^2$  составляет  $\approx 20\%$ . Кроме того, как любой сцинтилляционный детектор, этот детектор чувствителен и к любым ионизирующим излучениям, что позволяет использовать его в качестве универсального детектора ливневых установок (проект PRISMA [26]). Благодаря этим свойствам, детектор может одновременно регистрировать две важнейшие компоненты ШАЛ (электроны ( $e$ ) и адроны через тепловые нейтроны ( $n$ ), что и определило его наименование – эн-детектор). Важным достоинством этих детекторов является низкая стоимость ( $\sim 1000\$$  за детектор площадью  $0.35 \text{ м}^2$ ). Это позволяет создать установку большой площади  $\sim 10^4 \text{ м}^2$  (с возможностью ее неограниченного расширения) из нескольких сотен эн-детекторов, установленных в виде сетки с шагом в несколько метров, для изучения как адронной, так и электромагнитной компонент ШАЛ, а через них восстанавливать спектр и химический состав первичных космических лучей [27]. Первым проектом такого типа стал проект «Мультиком» [28], а первым прототипом такой установки, созданной на базе одного эн-детектора и четырех толстых сцинтилляционных детекторов, была установка «Мультик» на Баксане (БНО ИЯИ РАН), где была впервые опробована методика использования сцинтилляционных нейтронных детекторов для регистрации одновременно электронной и нейтронной компонент ливня и показана возможность независимой работы установки для изучения ШАЛ на основе



только таких детекторов. Схема и фотография установки показаны на рис.

6.



*Рис. 6. Установка «Мультик», Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН.*

Затем был разработан проект установки PRISMA-32 [29], состоящей из 32 таких детекторов на базе экспериментального комплекса НЕВОД [30]. При создании этой установки была отработана оптимальная конструкция детектора, технология триггирования установки и отбора событий и т. д. В 2013 году был создан прототип высокогорной ливневой установки PRISMA-YBJ [31] из 4 эн-детекторов на Тибете на плато YangBaJing на базе установки ARGO-YBJ [32]. В конце 2015 года на базе ЭК НЕВОД создана установка УРАН из 72 эн-детекторов, расположенных на крышах двух рядом стоящих зданий [33]. В 2016 году планируется расширение установки PRISMA-YBJ до 16 детекторов, а с 2017 года планируется начать строительство полномасштабной установки PRISMA-

LHAASO из 441 детектора в рамках международного проекта LHAASO [34].

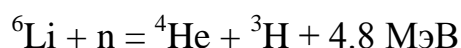
В диссертационной работе дано подробное описание двух действующих прототипов PRISMA-YBJ и PRISMA-32, расположенных на разных высотах над уровнем моря. Проводится анализ и сравнение полученных на них экспериментальных данных, касающихся свойств адронной компоненты ШАЛ, как между собой, так и с результатами моделирования экспериментов методом Монте-Карло. Представлены экспериментальные результаты исследований фона в местах проведения экспериментов.

Результаты работы были доложены на российских и международных конференциях: 33-й Всероссийской конференции по космическим лучам, 18-м Международном симпозиуме ISVHECRI-2014, 14-й Международной конференции TAUP-2015. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ ([39], [42], [43], [48], [50], [54], [55], [63], [68]), из которых 4 в рецензируемых научных изданиях.

# Глава 1. Электронно-нейтронный детектор и эффективность регистрации нейтронов.

## 1.1. Сцинтилляторы.

**1.1.1. ZnS(Ag)+<sup>6</sup>LiF.** Для исследования адронной компоненты ШАЛ через вторичные тепловые нейтроны совместно с электронной компонентой в ИЯИ РАН были разработаны электронно-нейтронные детекторы (эн-детекторы) [35]. В их основе лежала идея использования сцинтиллятора-компаунда, состоящего из ZnS(Ag) и LiF обогащенного <sup>6</sup>Li до 90% (природное содержание ~7.5%). В настоящее время сцинтиллятор такого типа активно применяется для нейтронографии [36]. При взаимодействии теплового нейтрона с <sup>6</sup>Li происходит развал составного ядра на тритон и альфа-частицу с выделением энергии 4,8 МэВ:



Эта энергия преобразуется сцинтиллятором в свет и регистрируется фотоэлектронным умножителем. Средняя толщина сцинтиллятора составляет  $\approx 30 \text{ мг/см}^2$ . Эффективность захвата тепловых нейтронов сцинтиллятором  $\approx 20\%$ . Соединение представляет собой белый порошок с размером гранул  $\sim 300\text{-}800 \text{ мкм}$ . Сцинтиллятор насыпается равномерным слоем в одну гранулу на листы белой липкой бумаги и ламинируется вместе с бумагой с двух сторон. Из нескольких заламинированных листов

склеивается круг диаметром 70 см. Образец заламинированного листа литиевого сцинтиллятора показан на рис. 7 слева. Недостатки данной технологии:

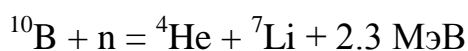
1) недостаточная равномерность покрытия листов порошком, потому что где-то немного больше порошка прилипает к бумаге, где-то меньше. Особенно это проявляется при попытке увеличить толщину сцинтиллятора;

2) при ламинировании в некоторых местах остаются пузырьки воздуха, которые при перемещении сцинтиллятора в горы (на Тибет, высота 4300 м) вздуваются.

**1.1.2.  $ZnS(Ag)+B_2O_3$ .** В 2014-2015 годах нами совместно с ЗАО НПФ «Люминофор» (Ставрополь) был разработан сцинтиллятор  $ZnS(Ag)+B_2O_3$  на основе натурального бора. Создание такого сцинтиллятора не было открытием, он выпускался в советское время в Грузии на обогащенном боре (90%  $^{10}B$ ) и уже использовался неоднократно в других работах [37], однако в нашей стране до недавнего времени не было такого производства на необогащенном боре. В процессе разработки, тестирования и сравнения большого количества образцов было достигнуто высокое качество продукта.

В природном боре содержится ~20%  $^{10}B$ , который имеет большее сечение захвата тепловых нейтронов, чем  $^6Li$  (3840 барн против 945 барн). При взаимодействии  $^{10}B$  с тепловым нейтроном составное ядро  $^{11}B$

распадается на альфа-частицу и  ${}^7\text{Li}$  с выделением энергии 2.3 МэВ (в 94% случаев):



По физическим свойствам это так же белый порошок. С одной стороны, сечение захвата тепловых нейтронов у  ${}^{10}\text{B}$  выше, чем у  ${}^7\text{Li}$ . С другой, энерговыделение реакции, и, следовательно, количество света и величина импульса, почти вдвое меньше. Экспериментально было получено, что при толщине борного сцинтиллятора  $50 \text{ мг/см}^2$  эффективность регистрации нейтронов детектором совпадает с эффективностью регистрации нейтронов при использовании обогащенного литиевого сцинтиллятора толщиной  $30 \text{ мг/см}^2$ . При этом, во-первых, стоимость необогащенного борного сцинтиллятора более чем в 5 раз ниже, чем стоимость обогащенного литиевого, а, во-вторых,  ${}^6\text{Li}$  является стратегическим материалом, находится на особом учете, и получить его в количествах необходимых для создания большой установки крайне сложно. Кроме того, работы по созданию и тестированию новых образцов сейчас продолжаются, в том числе и с другими соединениями бора, в молекулах которых процентное содержание атомов бора больше чем в оксиде. Аналогичные работы ведутся сейчас, очевидно, и в других странах, в частности в Великобритании [38].

Вместо ламинирования порошка при создании будущих установок было предложено заливать его жидкой силиконовой резиной очень

высокой прозрачности также на подложке из прочной белой самоклеющейся пленки и наклеенной поверх неё белой бумаги. Именно пленка в данном случае обеспечивает высокую прочность готового изделия, не позволяет ему рваться, например, в процессе транспортировки. Бумага наклеивается поверх пленки потому, что в жидком виде резина пропитывает её и после застывания не отслаивается, как это происходит, если наливать резину прямо на пленку. В целом данная технология значительно повысила равномерность покрытия, механическую прочность и простоту изготовления сцинтиллятора.

Данный сцинтиллятор уже использован в установке УРАН (72 эн-детектора), созданной в ЭК НЕВОД в сотрудничестве с ИЯИ РАН. В дальнейшем именно его планируется использовать при создании PRISMA-LHAASO (441 детектор). Образцы сцинтилляторов показаны на рис. 7 и 8.



*Рис. 7. Слева: образец сцинтиллятора  $ZnS(Ag)+{}^6LiF$ , порошок средней толщиной  $30 \text{ мг/см}^2$  заламинирован на белой бумаге. Данный сцинтиллятор был использован в установках МУЛЬТИКОМ, PRISMA-32, PRISMA-YBJ. Справа: образец сцинтиллятора  $ZnS(Ag)+B_2O_3$ , толщиной  $50 \text{ мг/см}^2$  залит на белой бумаге в жидкую резину. Данный сцинтиллятор использован в установке URAN.*



*Рис. 8. Слева: сцинтиллятор  $ZnS(Ag)+{}^6LiF$  на дне детектора ( $D=70$  см).  
Справа: сцинтиллятор  $ZnS(Ag)+B_2O_3$  на дне детектора ( $D=70$  см).*

### **1.2 Конструкция детектора.**

Современная конструкция эн-детектора была разработана совместно ИЯИ РАН и НИЯУ МИФИ в 2010-2011 годах, при создании проекта установки PRISMA-32. В качестве корпуса детектора используется стандартная бочка (бак для воды), изготовленная из черного полиэтилена толщиной 8 мм. Внутри корпуса размещен конус из светоотражающего материала (пенофола). В основании конуса расположен сцинтиллятор. В вершине конуса под крышкой на специальных металлических крепежах подвешен фотоумножитель (ФЭУ-200) с делителем, а на крышку выведены разъемы для питания ФЭУ и съема сигналов с 7-го и 12-го динодов и анода. Подробнее об устройстве эн-детектора можно прочитать в [39]. Конструкция эн-детектора показана на рис. 9. Фото эн-детектора показано на рис. 10.

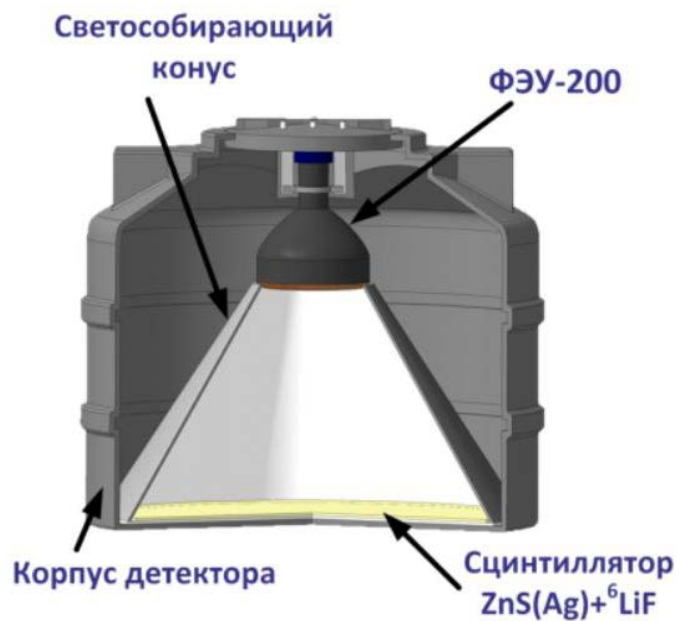


Рис. 9. Схема эн-детектора установок PRISMA-32, PRISMA-YBJ, УРАН.



Рис. 10. Эн-детектор в разобранном виде. Фото сделано в экспериментальном комплексе НЕВОД в ходе сборки установки PRISMA-32 (2011 г.).



### **1.3 Измерительный стенд для калибровки детектора.**

Для изучения сигналов с детекторов, проведения сравнительных измерений с новым борным сцинтиллятором был создан измерительный стенд. В состав стенда входят:

- 1) эн-детектор
- 2) интегральный дискриминатор-усилитель (ДИУ)
- 3) 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADlink 9812
- 4) промышленный компьютер

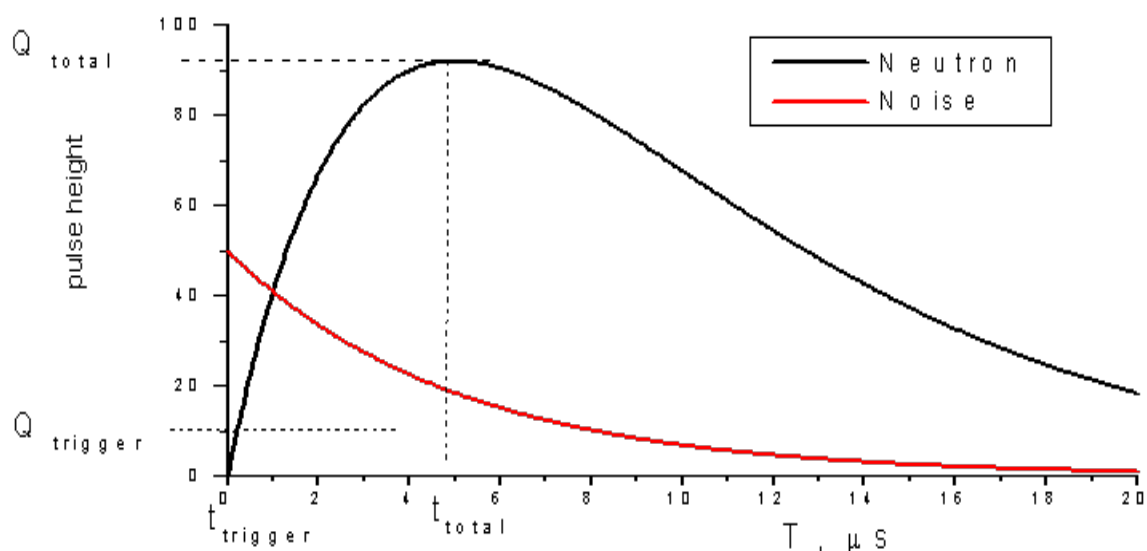
Интегральный дискриминатор-усилитель имеет плавно настраиваемый порог, два выхода интегрированного сигнала со временами интегрирования 1 мкс и 5 мкс либо 22 мкс) соответственно, а также два выхода триггерных сигналов: для стандартов TTL и NIM. 4-канальный аналого-цифровой преобразователь (FADC) PCI-9812 представляет собой плату на шине PCI и установлен в соответствующий слот компьютера.

Сигналы с детектора снимаются с последнего 12-го динода (ФЭУ-200), после чего поступают на дискриминатор-интегратор-усилитель (ДИУ). Сигналы интегрируются со временем  $\tau = 5$  мкс (для литиевого сцинтиллятора), либо  $\tau = 22$  мкс (для борного). Для борного сцинтиллятора используется большее время интегрирования, поскольку энергия, выделяемая при захвате нейтрона на боре меньше, и дольше собирая заряд, мы увеличиваем полезный сигнал (подавляя при этом более короткие

фоновые) и, тем самым, минимизируем потери в амплитуде сигнала. ДИУ располагается непосредственно на детекторе. После усиления сигнал поступает по кабелю на вход АЦП (FADC). Дискриминатор в случае превышения порога посылает триггерный сигнал на АЦП.

#### **1.4 Сигналы с детектора. Регистрация тепловых нейтронов.**

После оцифровки сигнал отбирается по форме импульса либо как нейтронный («медленный»), либо как шумовой («быстрый», куда попадают шумы ФЭУ, либо одновременное прохождение через сцинтиллятор нескольких заряженных частиц или гамма-квантов). На рис. 11. показано как выглядят сигнал от нейтрона (с медленным нарастанием) и шумовой.

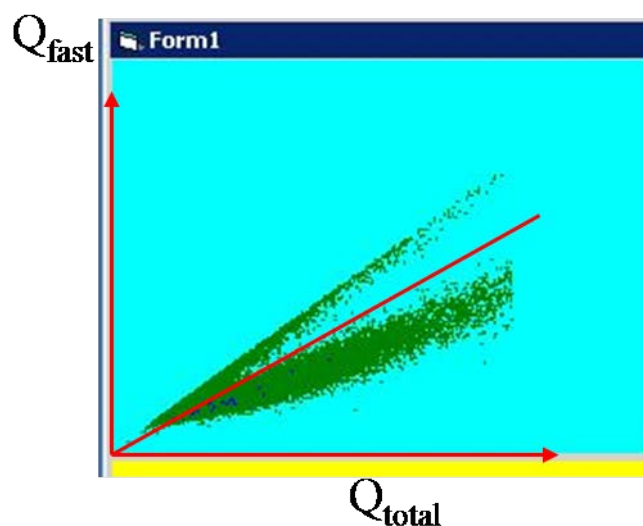


*Рис. 11. Осциллограмма нейтронного импульса (черный) и шумового/от заряженных частиц (красный) при интегрировании с временем 5 мкс.*

Разница в форме импульса объясняется тем, что сцинтиллятор имеет много временных компонент и тяжелые частицы ( $\alpha$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Li}$ ) возбуждают, в том числе, и «медленные» компоненты сцинтиллятора  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ , в результате чего при относительно большом интегрировании (от 5 до 20 мкс) увеличивается время собирания заряда и, следовательно, нарастания фронта импульса. Шумовой сигнал, напротив, всегда имеет резкий фронт. Релятивистские  $\beta$ ,  $\mu$  и  $\gamma$  возбуждают, в основном, быстрые компоненты  $\text{ZnS}$  ( $\sim 40$  нс) и, в результате, тоже дают резкий фронт, укладывающийся в первые 1-2 временных бина по 50 нс. При этом если сравнивать величину импульса от прохождения электрона/мюона и от захвата нейтрона, амплитуда последнего примерно в 5-10 раз выше. Ионизационные потери высокоэнергичного мюона при прохождении через тонкий сцинтиллятор:  $dE = 2 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{г} \cdot 0.03 \text{ г}/\text{см}^2 \cdot 0.65$  (доля  $\text{ZnS}$  в сцинтилляторе) = 40 КэВ для лития и  $dE = 2 \text{ МэВ} \cdot \text{см}^2/\text{г} \cdot 0.05 \text{ г}/\text{см}^2 \cdot 0.65 = 60 \text{ КэВ}$  для бора. Энергия, выделяющаяся, при захвате нейтрона и распаде возбужденного ядра в  $^6\text{Li}$  – 4.8 МэВ, в  $^{10}\text{B}$  – 2.3 МэВ, то есть в 30-80 раз больше. К сожалению, на данный момент используемые сцинтилляторы представляют собой сплавленные зерна  $\text{ZnS}$  с зернами оксида бора или фторида лития. Такая форма приводит к существенным потерям энергии при выходе тяжелых частиц из зерна  $\text{B}_2\text{O}_3/\text{LiF}$  и попадании в зерно  $\text{ZnS}$ . В результате, мы получаем разницу между амплитудой импульса от  $n$  и  $\mu$  примерно в 5-10 раз. Зернистая структура и непрозрачность  $\text{ZnS}$  к

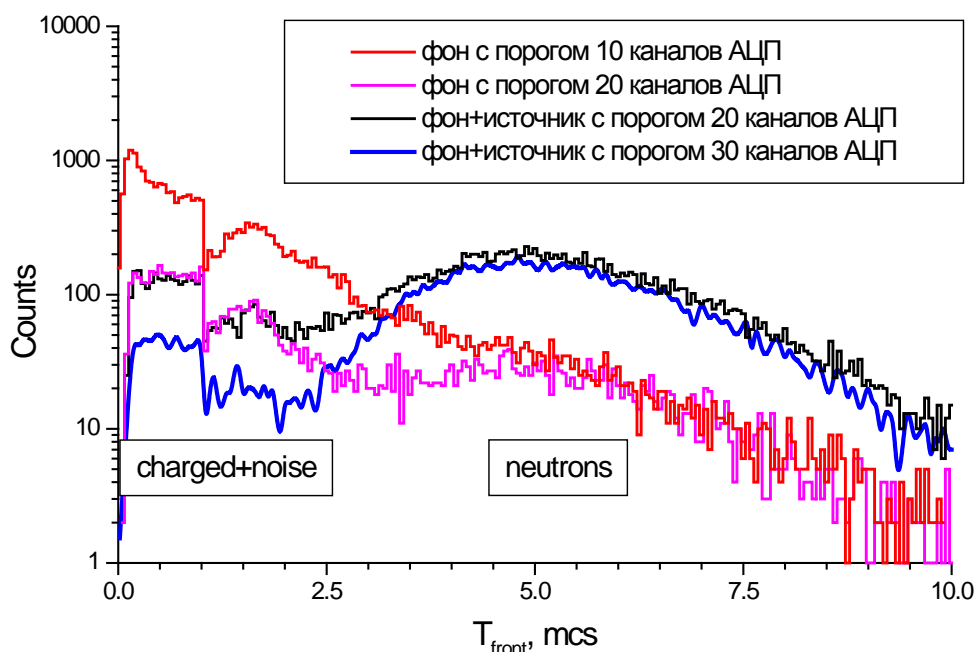
излучаемому им свету приводят к тому, что пик от одной частицы выделить не удастся. При этом нужно отметить, что сигнал от одной частицы очень мал и находится в области шумов ФЭУ, поэтому измерение одночастичных событий (заряженных) для данных сцинтилляторов не представляется возможным. Однако это же обстоятельство позволяет отсекал сигналы от одиночных заряженных частиц и гамма-квантов, делая детектор не чувствительным к внешнему радиоактивному фону и фону космических лучей (за исключением редких событий кратного прохождения заряженных частиц, например ШАЛ). Благодаря этому свойству, эн-детектор оказался очень удобным инструментом для изучения вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов.

На рис. 12 показано разделение накопленных импульсов по отношению амплитуды интегрированного импульса (т.е. собранного заряда) в момент срабатывания триггера к максимальной амплитуде импульса. Четко видна «вилка», то есть сигналы от нейтронов хорошо разрешаются относительно шумовых импульсов и импульсов от заряженных частиц.



*Рис. 12. Разделение сигналов по отношению  $Q_{fast}/Q_{total}$ .  $Q_{fast}$  – заряд собранный до момента срабатывания дискриминатора,  $Q_{total}$  – полный собранный заряд.*

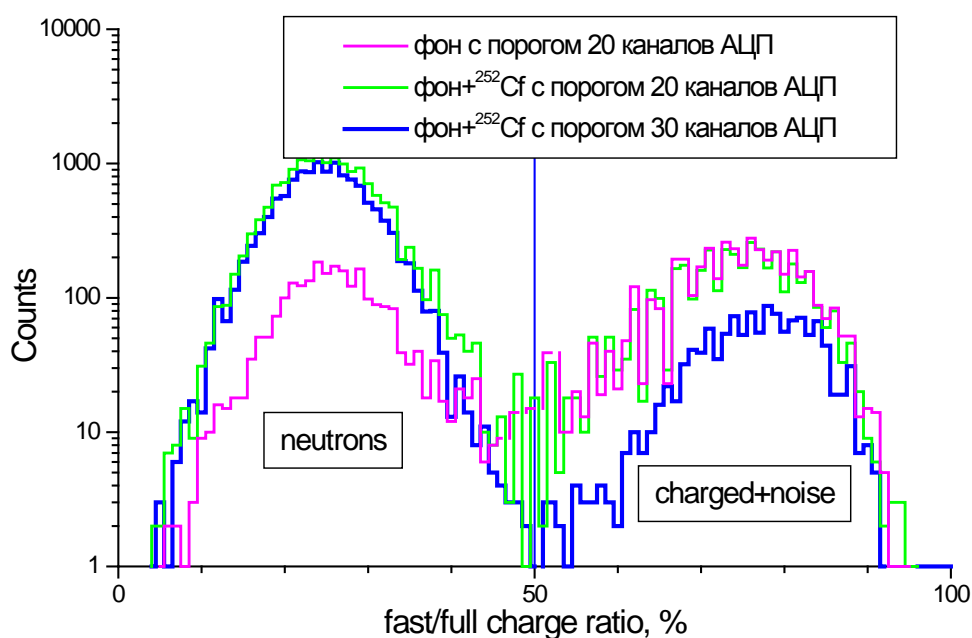
На рис. 13 показаны спектры фронтов нарастания сигналов, набранные в детекторе с использованием борного сцинтиллятора толщиной  $50 \text{ мг/см}^2$  с временем интегрирования 22 мкс и порогом 10 каналов АЦП.



*Рис. 13. Распределение импульсов детектора с борным сцинтиллятором по времени нарастания фронта. Разными цветами показаны распределения снятые с источником нейтронов ( $^{252}\text{Cf}$ ) и без него, а также с разными порогами.*

На рис. 13 показаны: спектр, набранный в обычных фоновых условиях (без источников), спектр с источником нейтронов Cf-252 в замедлителе и с порогом в 20 каналов АЦП и такой же спектр, набранный с порогом в 30 каналов. Из рисунка видно, что в области 5 мкс хорошо видны максимумы от нейтронных сигналов и видно, что после добавления источника нейтронов высота максимума значительно возрастает, а при небольшом изменении порога практически не меняется. В свою очередь левая часть сильно зависит от порога и не меняется при добавлении Cf. Это позволяет говорить о возможности отбирать нейтронные импульсы по времени нарастания фронта.

На рис. 14 показано распределение импульсов по соотношению быстрого заряда к полному ( $Q_{fast}/Q_{total}$ ). Под быстрым зарядом понимается заряд собранный к моменту срабатывания дискриминатора, а под полным – весь заряд, собранный за время интегрирования. Нейтронные импульсы, имея пологий фронт, попадают в левую часть распределения, а шумы и заряженные частицы – в правую. Из рис. 15 также можно сделать вывод о хорошем отборе нейтронных импульсов по данному соотношению.



*Рис.14. Распределение импульсов детектора с борным сцинтиллятором по соотношению «быстрого» заряда (собранного в первые 50 нс после триггера) к полному. Разными цветами показаны распределения снятые с источником нейтронов ( $^{252}\text{Cf}$ ) и без него, а также с разными порогами.*

В наших экспериментах по исследованиям вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов, где используется большое интегрирование, применяется одновременно отбор по амплитуде, времени нарастания

фронта импульса и соотношению быстрого заряда к полному. Отбракованные по этим критериям события не выбрасываются, а копируются в другом массиве. Поскольку мы оцифровываем все импульсы с помощью FADC, то анализ их формы позволяет полностью исключить любые помехи и электромагнитные наводки.

### ***1.5 Регистрация нейтронного фона. Глобальная сеть эндетекторов.***

Мониторинг фона тепловых нейтронов в месте проведения экспериментов по исследованию ШАЛ является важной самостоятельной задачей. Кроме того, поскольку тепловые нейтроны находятся в равновесии с окружающей средой, то с их помощью можно пытаться изучать свойства этой среды и решить самостоятельные геофизические задачи методами ядерной физики.

Во-первых, измерение спорадических вариаций фона позволяет наблюдать на Земле эффекты от процессов на Солнце, такие как форбуш-понижения и GLE [40]. Более того, измерение этих спорадических вариаций при помощи неэкранированных детекторов, чувствительных к адронам самых низких энергий позволяет получить информацию отличную от той, которую мы получаем от сети нейронных мониторов [41].



Во-вторых, регистрация фоновых тепловых нейтронов дает возможность исследовать такие физические процессы как возможное рождение нейтронов в молниевых разрядах [42], зависимость величины фонового потока нейтронов от количества осадков, толщины снежного покрова, что особенно важно при проведении действующих и будущих экспериментов проекта PRISMA.

В-третьих, наблюдая вариации величины фона тепловых нейтронов и кратного прохождения заряженных частиц (при низком пороге), таких как, например, каскады  $\gamma$ -квантов от  $\beta$ -распадов тяжелых нуклидов, связанных с радоном, можно исследовать геофизические процессы, поскольку часть нейтронов, особенно в подземных помещениях, и каскадов ионизирующих частиц связана с естественной радиоактивностью радона, а та, в свою очередь, чувствительна к движениям земной коры. Сегодня, используя частотный Фурье-анализ, мы наблюдаем солнечные и лунные периодичности, а также колебания Земли на собственных частотах [43].

Для задач мониторинга была создана сеть электронно-нейтронных детекторов, расположенных в различных местах в нескольких странах. Эти детекторы на основе литиевого сцинтиллятора работают так же, как и описанный выше стенд. То есть сигналы с детектора поступают на ДИУ, далее интегрируются со временем 5 мкс (за исключением детекторов, работающих в Китае, там  $\tau = 1$  мкс) и передаются на АЦП. В случае

превышения порога с ДИУ на АЦП (или на триггерный блок, работающий по схеме ИЛИ, если несколько детекторов) поступает сигнал NIM и происходит оцифровка импульса, отбор по форме и запись.

На данный момент наша глобальная сеть насчитывает 18 детекторов в 7 различных местах в трех странах мира. А именно: установка «Нейтрон» в Москве в ЭК НЕВОД (четыре эн-детектора на разных этажах здания), 1 эн-детектор в Москве в подвале НИИЯФ МГУ (25 м водного эквивалента), 1 детектор в Обнинске в Геофизической службе РАН, 6 эн-детекторов на Баксане, из них 5 на установке Ковер-2 (4 на поверхности и 1 в подвале мюонного детектора) и 1 эн-детектор в БПСТ на глубине 850 м водного эквивалента, 1 детектор на поверхности в лаборатории Гран-Сассо (1 км над уровнем моря), 4 детектора на Тибете в ангаре ARGO-YBJ на высоте 4300 м над уровнем моря (работают одновременно в шаловском режиме и вариационном). Полный список детекторов сети представлен в табл. 3, а их положение на рис. 15.

Табл. 3. Детекторы глобальной сети.

Номер установки	Место расположения	Номер детектора	Площадь	Тип размещения	Год начала работы
A1	НЕВОД, Москва	ЭН-1	0.75	подвал, 8 м в. э.	2011
A1	НЕВОД, Москва	ЭН-2	0.75	2-й этаж	2011
A1	НЕВОД, Москва	ЭН-3	0.75	3-й этаж	2011
A1	НЕВОД, Москва	ЭН-4	0.75	4-й этаж	2011
A1	НЕВОД, Москва	ЭН-5	0.36	крыша	2011
A2	МГУ, Москва	ЭН-6	0.75	подвал, 25 м в. э.	2011
A3	Ковер, БНО	ЭН-7	0.36	внутри, под 5 см полиэтилена	2013
A3	Ковер, БНО	ЭН-8	0.36	внутри	2013
A3	Ковер, БНО	ЭН-9	0.36	внутри	2013
A3	Ковер, БНО	ЭН-10	0.36	снаружи	2013
A3	Ковер, БНО	ЭН-11	0.36	подвал, 5 м в. э.	2008
A3	БПСТ, БНО	ЭН-12	0.36	БПСТ, 800 м в. э.	2009
A4	Обнинск	ЭН-13	0.36	внутри	2010
A5	Гран-Сассо, Асерджи	ЭН-14	0.36	внутри в легком ангаре	2009

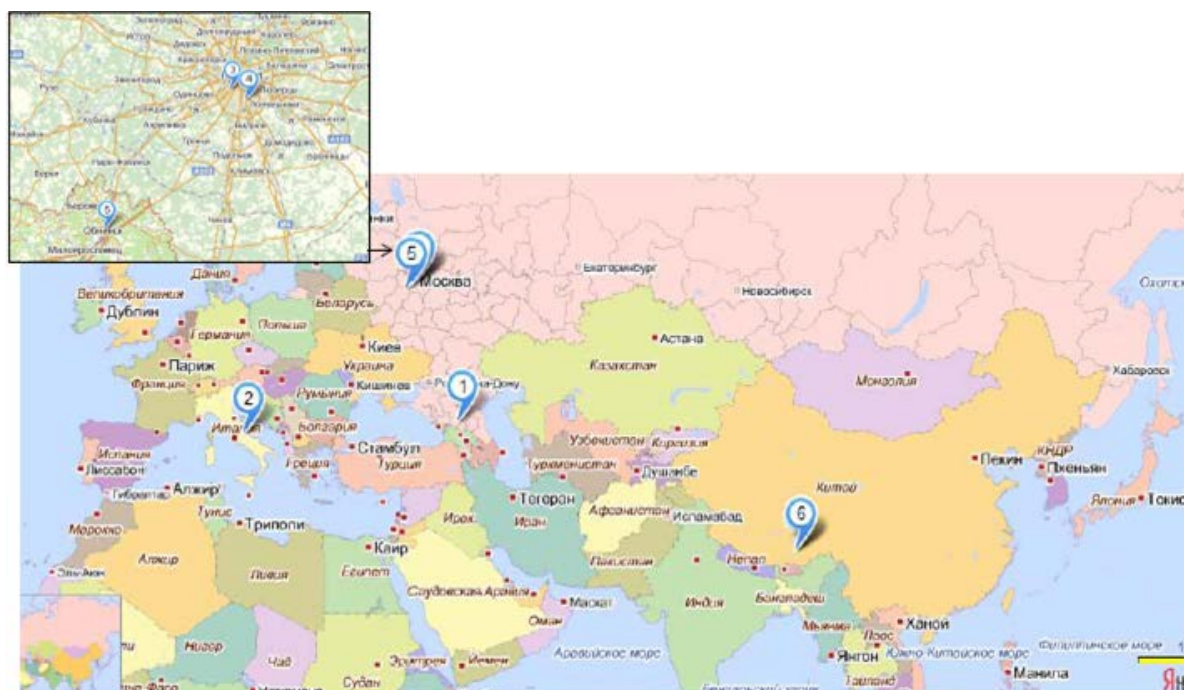


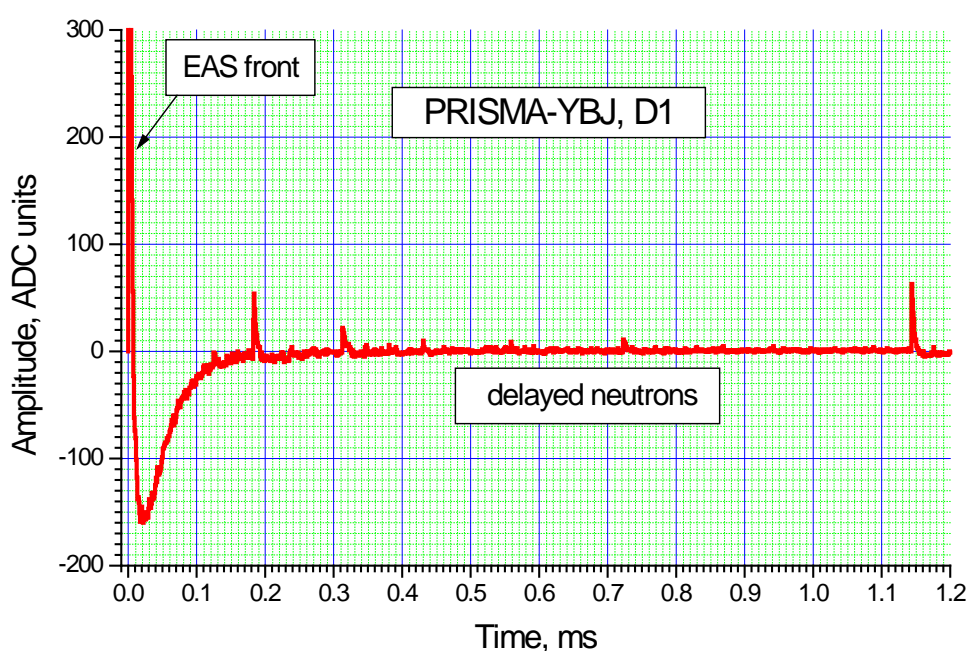
Рис. 15. Расположение эн-детекторов глобальной сети.

### ***1.6. Регистрация электромагнитной компоненты ШАЛ и тепловых нейтронов, рождаемых адронами ствола ливня.***

При работе в шаловском режиме сигналы с эн-детекторов одновременно снимаются с 12-го и 7-го динодов. Сигнал с 7-го динода нужен для увеличения динамического диапазона и используется в тех случаях, когда амплитуда сигнала превышает динамический диапазон ФЭУ по 12-му диноду, но промежуточный 7-й динод ещё не находится насыщении. Сигналы с 7 динодов поступают на интегральный усилитель (ИУ), где интегрируются со временем  $\tau = 1$  мкс, усиливаются и затем поступают на АЦП. Сигналы с 12-х динодов поступают на ДИУ, интегрируются со временем  $\tau = 1$  мкс, усиливаются и поступают на АЦП. В случае превышения порога дискриминатора вырабатывается триггерный сигнал NIM, который поступает на специальный блок управления. На этот блок управления сходятся сигналы со всех детекторов кластера, и в случае одновременного поступления триггерных сигналов одновременно с 2 и более детекторов выдается общий триггерный сигнал на АЦП. После этого запускаются все АЦП, и происходит оцифровка всех сигналов с детекторов в течение 20 мс с шагом 1 мкс. Подробнее схему работы кластера эн-детекторов можно посмотреть далее в описании установки PRISMA-32, а также в работах [44, 45].

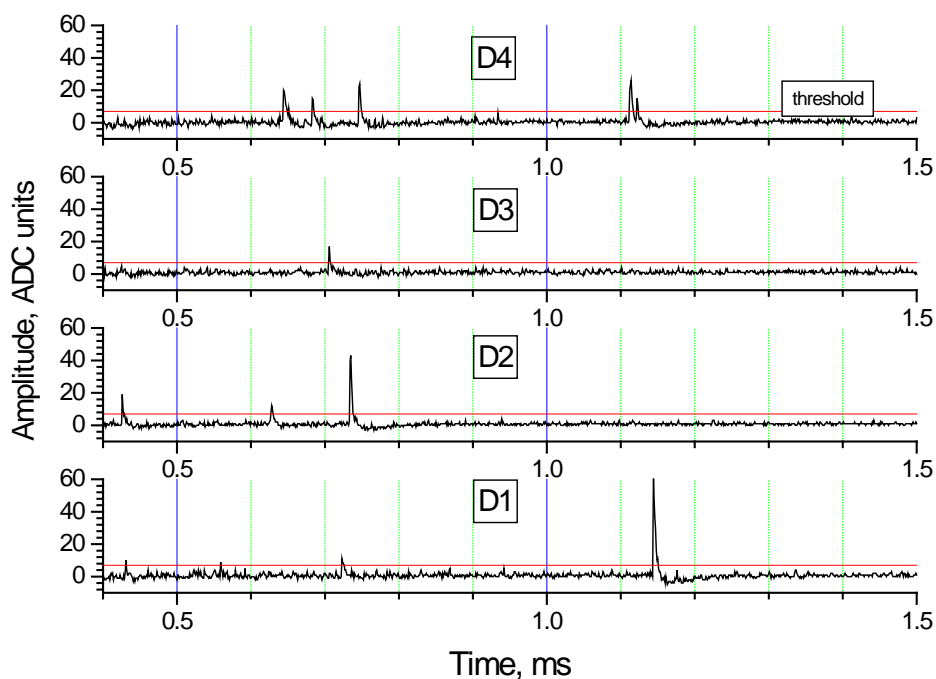
Осциллограмма одного события, полученная на установке PRISMA-YBJ (Тибет), показана на рис. 16. Первый большой импульс соответствует

прохождению большого числа заряженных частиц (электромагнитной компоненты ливня) через сцинтиллятор, последующие импульсы – запаздывающие тепловые нейтроны, рожденные адронами ШАЛ. Эти импульсы задержаны относительно времени прихода ливня, поскольку нейтронам требуется время, чтобы замедлиться (в грунте/бетоне это время  $\sim 0.5$  мс) и потом они живут там порядка 1 мс до захвата.



*Рис. 16. Оциллограмма ШАЛ, полученная на эн-детекторе установки PRISMA-YBJ. Первый большой импульс – энергосвечение в сцинтилляторе от электромагнитной компоненты, последующие импульсы – задержанные тепловые нейтроны от адронов ШАЛ.*

На рис. 17 крупно показаны импульсы от нейтронов в четырех детекторах установки PRISMA-YBJ для того же события.



*Рис. 17. Увеличенная осциллограмма импульсов от захвата задержанных тепловых нейтронов (по данным установки PRISMA-YBJ).*

Видно, что в основном нейтронные импульсы четко различимы на фоне шумов и колебаний нулевой линии АЦП. Однако вследствие короткого времени интегрирования (1 мкс), не весь заряд успевает собраться и не все захваченные в сцинтилляторе нейтроны дают импульс достаточный для превышения порога дискриминатора. Разделение по форме импульса при этом не оптимально и максимума от захвата нейтронов не наблюдается. Однако мы пошли на это ради улучшения временного разрешения необходимого для счета как можно большего числа нейтронных импульсов. В результате, при вероятности поглощения нейтронов в сцинтилляторе  $\approx 20\%$ , эффективность регистрации нейтронов детектором с учетом отбора по амплитуде составляет  $\approx 10-12\%$ .

Данная цифра была получена при внимательном анализе амплитудного распределения нейтронных импульсов в событиях, отобранных ливневым триггером.

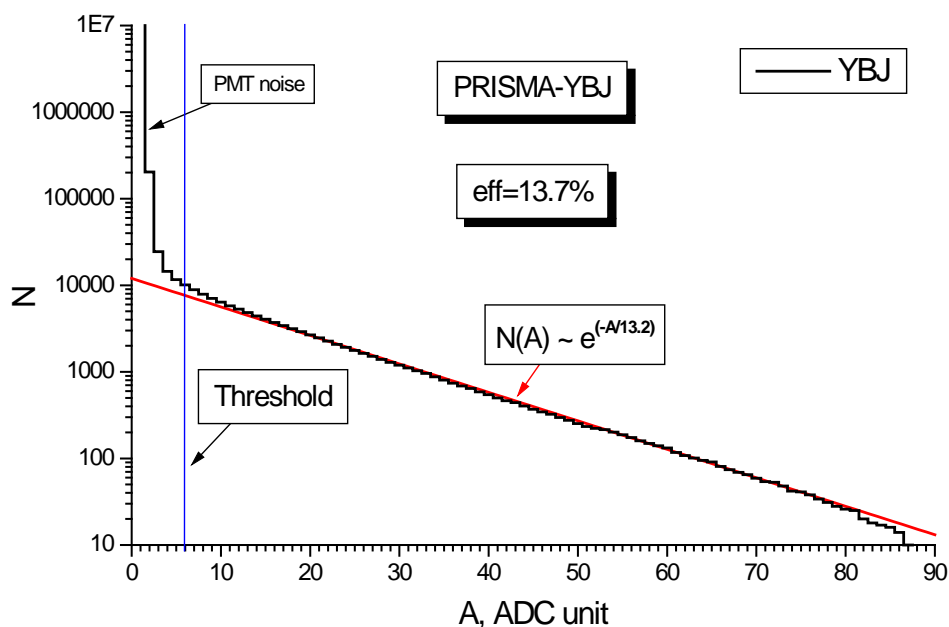


Рис. 18. Амплитудное распределение задержанных импульсов, полученное на установке PRISMA-YBJ.

На рис. 18 показано амплитудное распределение задержанных импульсов (от 100 мкс до 20 мс с шагом 1 мкс), полученное на установке PRISMA-YBJ. Синей чертой отмечен порог, используемый в эксперименте. Видно, что распределение после порога хорошо описывается экспонентой  $N(A) \sim e^{(-A/13.2)}$ . Слева от черты виден резкий рост – туда попадают шумы фотоумножителя и фон от заряженных частиц. При пошаговом анализе оцифрованного импульса видно, что  $A=1$  (1 канал АЦП), наблюдается практически всегда, то есть это некий постоянный

уровень шума смещающий нулевую линию. Следовательно, величина всех измеренных импульсов автоматически увеличена на единицу. Рассчитаем эффективность регистрации нейтронов, предполагая, что распределение нейтронных импульсов описывается экспонентой вплоть до нуля. Тогда эффективность равна площади под экспонентой справа от порога, деленной на полную площадь под экспонентой. Опуская вычисление интегралов, скажем что эффективность отбора равняется экспоненте в степени  $-(\text{значение порога}/\text{показатель экспоненты})$ , а с учетом того что нулевая линия сдвинута на 1 код АЦП  $-\left(\frac{\text{значение порога}-1}{\text{показатель экспоненты}}\right)$ :  $\text{Eff}_{\text{отбора}} = e^{-(\text{Thr}/13.2)} = e^{-((6-1)/13.2)} = 0.685$ . Полная эффективность регистрации равна  $\text{Eff} = \text{Eff}_{\text{сцинтиллятора}} * \text{Eff}_{\text{отбора}} = 20\% \times 0.685 = 13.7\%$ .

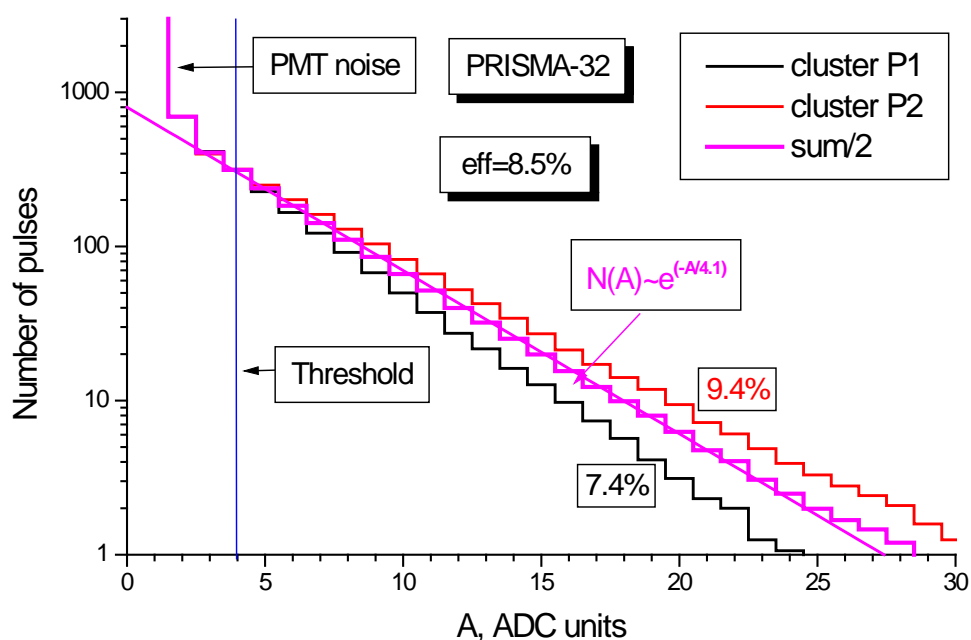


Рис. 19. Амплитудное распределение задержанных импульсов, полученное на установке PRISMA-32 (кластеры 1,2 и их полусумма).



На рис. 19 показано амплитудное распределение задержанных импульсов (от 100 мкс до 20 мс с шагом 1 мкс), полученное на установке PRISMA-32. Также синей чертой отмечен порог, используемый в измерениях. Распределение после порога хорошо описывается экспонентой  $N(A) \sim e^{-(A/4.1)}$ . При анализе оцифрованного импульса видно, что нулевая линия стабильна на значении 0. Дело в том, что, хотя ФЭУ в PRISMA-YBJ используются такие же как в PRISMA-32, число каналов АЦП на Тибете в два раза выше при таком же диапазоне (1 В), чем в Москве (в Москве используются четырехканальные 10-разрядные АЦП Adlink 9810, а на Тибете аналогичные 12-разрядные Adlink 9812). Следовательно, при том же усилении цена канала в два раза ниже. Если в YBJ мы имеем постоянный шум ФЭУ на уровне 1 канала АЦП, то в МИФИ тот же уровень шума соответствует 0.5 канала. Тогда эффективность отбора рассчитанная аналогичным образом как для PRISMA-YBJ равна экспоненте в степени  $-(\text{значение порога}/\text{показатель экспоненты})$ , а с учетом того что нулевая линия сдвинута на 0.5 код АЦП –  $((\text{значение порога}-0.5)/\text{показатель экспоненты})$ :  $\text{Eff}_{\text{отбора}} = e^{-(\text{Thr}/13.2)} = e^{-((4-0.5)/4.1)} = 0.425$ . Полная эффективность регистрации равна  $\text{Eff} = \text{Eff}_{\text{сцинтиллятора}} * \text{Eff}_{\text{отбора}} = 20\% \times 0.425 = 8.5\%$ . В МИФИ эффективность регистрации нейтронов ниже, чем в YBJ, прежде всего из-за более высокого порога. На рис. 19 видно, что значение порога можно было бы сделать ниже на единицу, но оно было выбрано таким, чтобы избежать

ложных импульсов от помех техногенного происхождения (работы на НЕВОДе, включение кран-балки и др.).

## **Глава 2. Проект PRISMA**

### ***2.1. Идея проекта***

В 2008 году был предложен проект [46] гибридной установки для изучения ШАЛ в области  $10^{14}$ - $10^{18}$  эВ, позволяющей регистрировать одновременно электромагнитную, мюонную и адронную компоненты ШАЛ. Проект был назван PRImary Spectrum Measurement Array (PRISMA) по аналогии с оптической призмой, которая расщепляет белый свет на составляющие и позволяет наблюдать различающиеся по длине волны. Так же и PRISMA позволяет выделить из ШАЛ нужные компоненты и изучать их.

В основе проекта лежал ковер из 400 электронно-нейтронных сцинтилляционных детекторов размером  $100 \times 100$  м<sup>2</sup> с расстоянием 5 м между детекторами. Кроме того, предлагалось разместить под землей в центре этого ковра мюонный детектор большой площади (например, подобный тому который работает на Баксане в установке «Ковер-2», либо большой трековый детектор). Для увеличения углового разрешения и расширения динамического диапазона на расстояниях  $\sim 200$  м от центра установки предлагалось разместить детекторы внешнего триггера

(обычные сцинтилляционные детекторы). Подробнее о проекте можно прочитать в работе [47]. Схема проекта PRISMA показана на рис. 20.

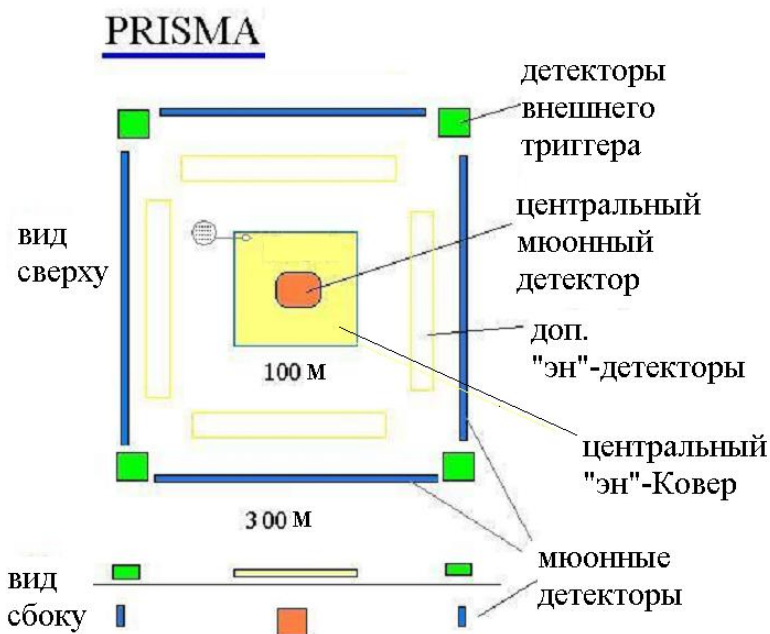
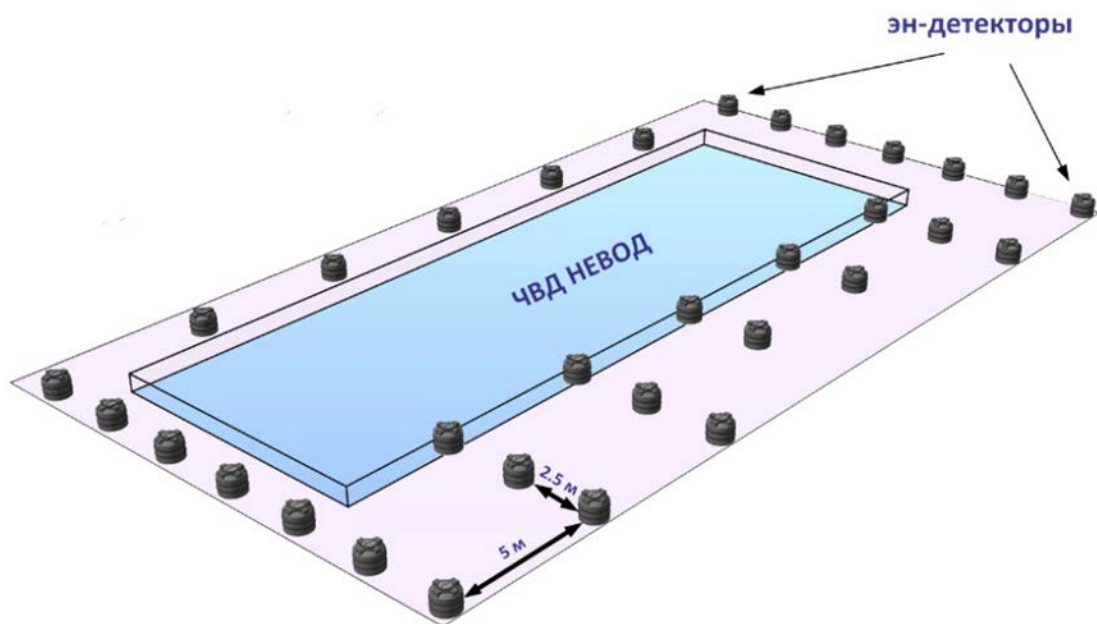


Рис. 20. Схема проекта PRISMA на основе электронно-нейтронных детекторов из [47].

## 2.2. Установка PRISMA-32

Установка PRISMA-32 начала создаваться в 2010 году. В начале 2011 году был включен в работу первый кластер установки (16 детекторов), была опробована методика и получены первые результаты [48]. В конце 2011 года был развернут второй кластер (16 детекторов), и установка начала свою работу в непрерывном режиме в феврале 2012 года. Установка расположена на 4 этаже экспериментального комплекса НЕВОД вокруг бассейна и состоит из 32 детекторов. Схема установки показана рис. 21.



*Рис. 21. Схема установки PRISMA-32. В центре бассейн черенковского водного детектора НЕВОД. [<http://uninevod.mephi.ru/ru/prisma.html>]*

Детекторы, как уже было сказано, разделены на два кластера по 16 детекторов. В детекторах использован сцинтиллятор на основе  ${}^6\text{Li}$  и фотоумножители ФЭУ-200. Схема электроники установки показана на рис. 22, и включает в себя ДИУ (по одному на каждый детектор), триггерные блоки (по одному на каждый кластер), 4-х канальные 10-разрядные FADC Adlink (по 4 АЦП на каждый кластер для 12-х динодов и ещё по 4 для 7-х динодов), промышленные компьютеры (по две штуки на каждый кластер).

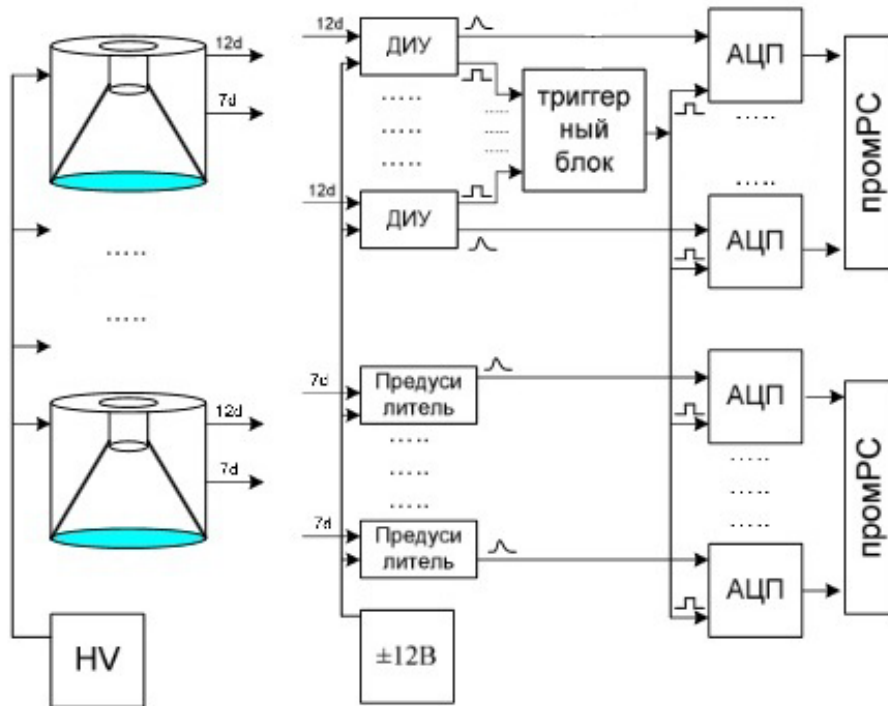
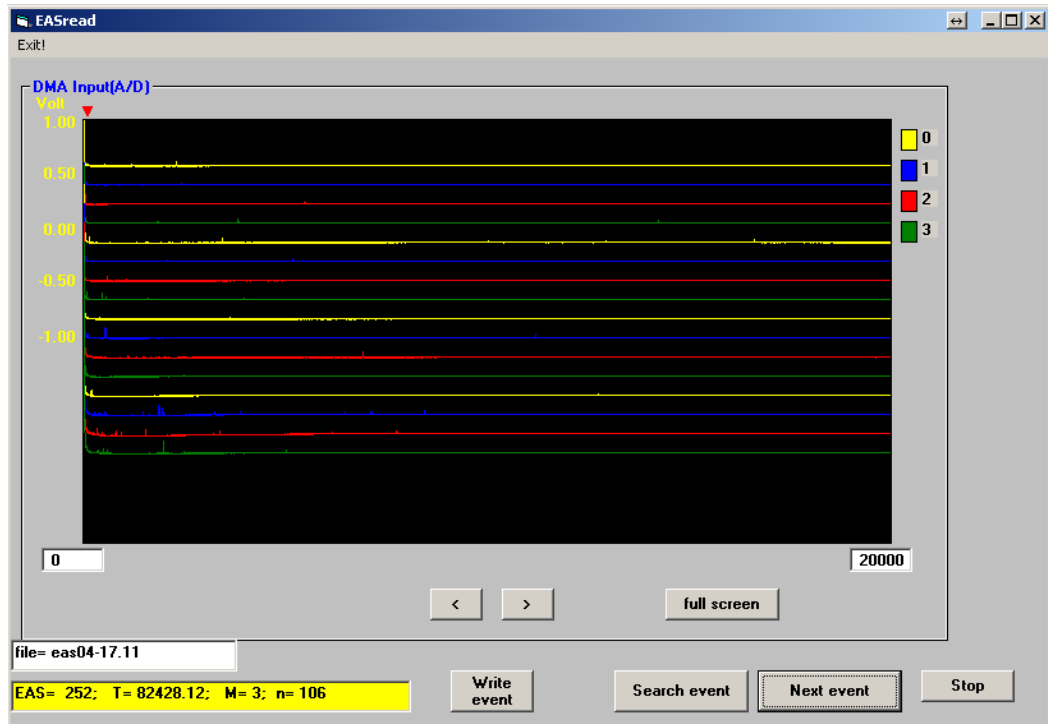


Рис. 22. Схема электроники кластера установки PRISMA-32.

На рис. 23 показан интерфейс программы просмотра осциллограмм событий в кластерах PRISMA-32. В окне программы видны осциллограммы сигналов с 16 детекторов первого кластера установки для одного из событий, зарегистрированных установкой. В начале каждого сигнала виден мощный импульс, соответствующий проходу электромагнитной компоненты ливня через сцинтиллятор, и последующие задержанные импульсы от нейтронов. Время оцифровки 20 мс с шагом 1 мкс, т. е. 20000 точек.



*Рис. 23. Программа просмотра событий установки PRISMA-32. На экране видны осциллограммы с 16 детекторов первого кластера установки. Событие зарегистрировано в ходе работы установки в тестовом режиме в ноябре 2011 года.*

На рис. 24 показан интерфейс программы просмотра событий установки PRISMA-32. Для примера выбран самый мощный ливень из числа зарегистрированных установкой с размером  $N_e \sim 10^7 - 10^8$ , что соответствует энергии первичной частицы  $E_0 \sim 10^{17}$  эВ.

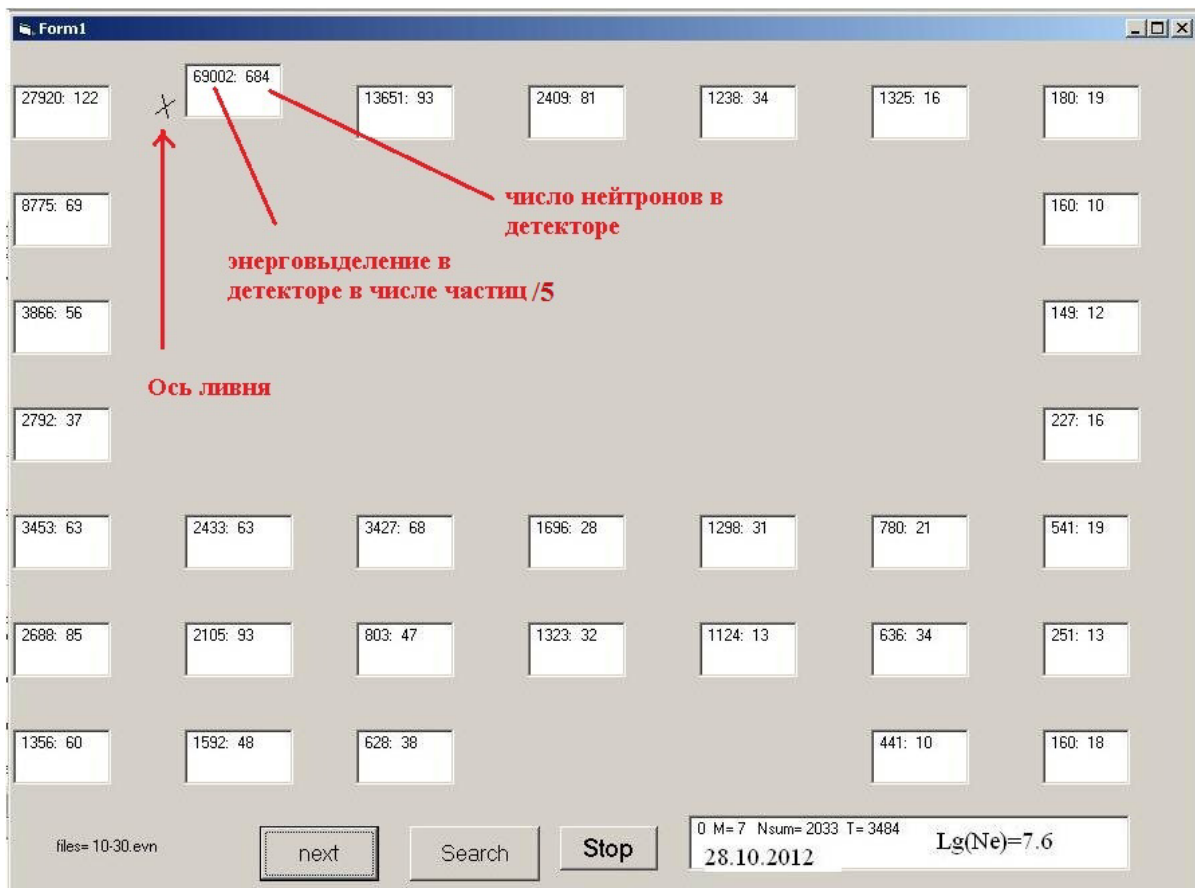


Рис. 24. Программа просмотра событий установки PRISMA-32. Пример мощного ШАЛ с энергией  $\sim 10^{17}$  эВ.

На рис. 25 показана фотография детекторов установки PRISMA-32 в конечном виде. В правом верхнем углу фото ЭК НЕВОД снаружи.



*Рис. 25. Фото установки PRISMA-32 в конечном виде (2012 г.). На фото Громушкин Д. М. В правом верхнем углу фото здания экспериментального комплекса НЕВОД.*

### **2.3. Установка PRISMA-YBJ.**

Осенью 2012 года 4 эн-детектора были собраны в Пекине и затем перевезены на высокогорное плато Янгбаджинг, расположенное в горах Тибета на высоте 4300 метров примерно в 100 км от столицы Тибетского автономного округа г. Лхаса. Там они были установлены в ангаре совместного китайско-итальянского эксперимента ARGO-YBJ, прямо поверх одного из кластеров ARGO-YBJ. Вид со спутника и фото ангара ARGO-YBJ показаны на рис. 26.



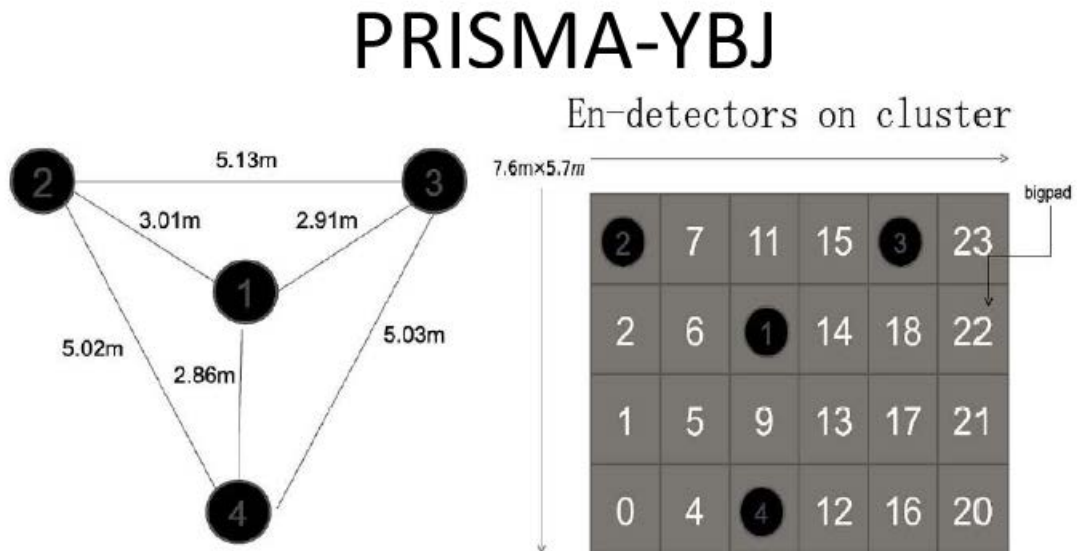


*Рис. 26. Слева: снимок плато YBJ из космоса (Google maps). На снимке: по центру – установка Tibet-ASy, рядом синего цвета – ангар ARGO-YBJ, красным кружком обозначено примерное положение установки PRISMA-YBJ. Справа: фото Ю. В. Стенькин и О. Б. Щеголев на фоне ангара ARGO-YBJ, 2013 г.*

Автор считает необходимым сказать несколько слов о данном эксперименте, поскольку с ним проводилась совместная калибровка, а также сравнение некоторых экспериментальных результатов. ARGO-YBJ – совместный китайско-итальянский эксперимент, запущенный в 2002 году и закрытый в феврале 2013 года. Он представляет собой сплошной ковер резистивных камер покрывающий площадь  $80 \times 80 \text{ м}^2$ . Подробнее с деталями данного эксперимента можно ознакомиться в работах [32, 49]. Основным направлением данного эксперимента была гамма-астрономия, но также проводились исследования широких атмосферных ливней, в частности опубликован спектр ПКЛ от нескольких десятков ТэВ до нескольких ПэВ, а также работа по ФПР электронов вблизи оси ШАЛ.

Таким образом, четыре детектора установки PRISMA-YBJ были установлены поверх резистивных камер ARGO в следующей

конфигурации: один детектор в центре и 3 детектора на расстоянии 3 м от него и на равных расстояниях друг от друга. Схема установки показана на рис 27.



*Рис. 27. Слева: первоначальная схема установки PRISMA-YBJ (01.2013-08.2013). Справа: расположение детекторов PRISMA-YBJ на “BigPads” ARGO-YBJ.*

На момент установки наших детекторов работа ARGO-YBJ уже была временно приостановлена, и решался вопрос о продлении эксперимента (на тот момент истек запланированный 10-летний срок эксплуатации установки). В январе-феврале 2013-го года был запущен двухнедельный сеанс работы ARGO, в ходе которого была проведена совместная калибровка наших эн-детекторов с RPC ARGO по электромагнитной компоненте. Калибровочный график приведен на рис. 28. По результатам данной работы подготовлена к публикации совместная статья [50].

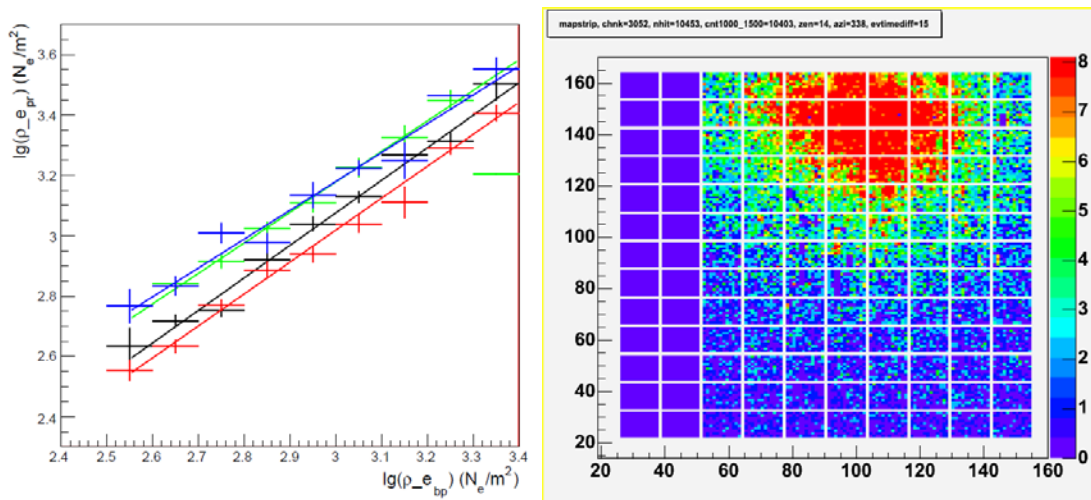


Рис. 28. Слева: кросс-калибровочный график энерговыделений в детекторах ARGO-YBJ и PRISMA-YBJ. По оси Y энерговыделение в детекторах PRISMA, по оси X – в ARGO. Справа: изображение ШАЛ, полученное в ARGO.

В августе 2013-го года в ходе нашей командировки на Янгбаджинг была изменена конфигурация установки: расстояния между центральным детектором и остальными было увеличено с 3-х до 5-ти метров (рис. 29).

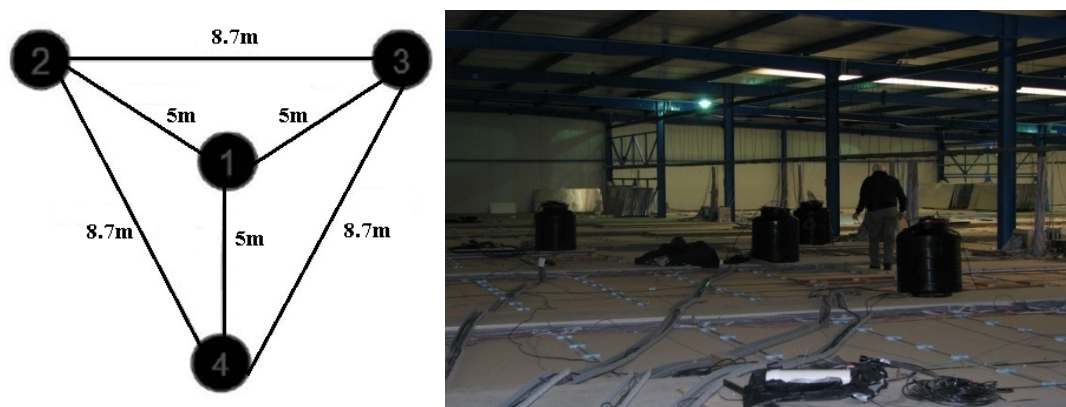


Рис. 29. Слева: современная схема установки PRISMA-YBJ. Справа: фото Ю. В. Стенькин на фоне установки.

Схема электроники эксперимента PRISMA-YBJ совпадает с PRISMA-32, единственной отличие в том, что на Тибете использовались 12-разрядные АЦП (Adlink PCI-9812) вместо 10-разрядных (Adlink PCI-9810) в Москве. Благодаря этому чувствительность канала АЦП была

повышена: с  $\sim 5$  до  $\sim 2.5$  частиц на канал, порог регистрации ливней был снижен. Эта цифра была получена экспериментально в ходе работ на установке PRISMA-32 [45], а затем подтверждена в результате проведения калибровочного эксперимента совместно с ARGO-YBJ (см. рис. 28), [50].

Триггер на запись события вырабатывается при превышении порога дискриминаторов, по меньшей мере, двух детекторов, однако при анализе используются только 4-кратные совпадения из-за недостаточно точной локации оси в событиях меньшей кратности.

На момент написания данной работы время непрерывной экспозиции установки PRISMA-YBJ составляет более 2.5 лет. За это время накоплено более 1.5 млн событий с двукратными совпадениями и  $\sim 800$  тыс. событий с 4-кратными. В текущем (2016) году планируется расширение данной установки с 4-х до 16-ти детекторов. При этом в новом виде в установке будут использованы: борный сцинтиллятор вместо литиевого, ФЭУ Beijing Hamamatsu CR-165 (4") вместо ФЭУ-200, 16-канальный 14-разрядный АЦП производства Сычуаньского университета (Sichuan University, Chengdu, China) вместо 4-канальных 12-разрядных АЦП Adlink. Таким образом, новая установка будет представлять собой один стандартный кластер будущей большой установки PRISMA-LHAASO, и затем будет просто расширяться за счет добавления новых кластеров.

## Глава 3. Результаты экспериментов

### 3.1. Программы для обработки данных.

Для обработки данных установок PRISMA-YBJ и PRISMA-32 использовались две программы, написанные независимо разными людьми на языках Visual Basic и C++ соответственно (далее *программы 1 и 2*). Алгоритмы программ отличаются методикой локации осей ШАЛ. При относительно небольшом числе детекторов локация оси представляет собой важную и непростую задачу. В обеих программах используется локация оси посредством наложения НКГ-функции на данные детекторов и подбором наиболее подходящих положений осей ШАЛ ищется максимум функции правдоподобия. В *программе 1* по заранее заданной площади, включающей в себя установку, случайным образом бросаются координаты оси ШАЛ ( $x$ ,  $y$ ) и возраст ливня. Далее методом максимального правдоподобия ищется функционал (сумма квадратов отклонений НКГ функции от показаний детекторов в каждой точке, включая и нулевые показания). Причем, весь этот процесс повторяется дважды: первый раз грубо определяется область, в которой находится ось, второй раз уже в выбранной области производится более точный поиск. В *программе 2* координаты центра бросаются не абсолютно случайным образом, а при помощи симплекс-метода. Была проведена проверка этих двух программ, обработка имеющихся экспериментальных данных

посредством их и сопоставление результатов. Было обнаружено хорошее согласие во всех полученных результатах. Учитывая тот факт, что программы были написаны независимо и с использованием различных алгоритмов вероятность наличия в них совпадающих методических или случайных ошибок минимальна.

В ходе тестирования программ было проведено сравнение ошибки локации оси при обработке модельных данных для установок PRISMA-YBJ и PRISMA-32. В данных моделирования нам заранее известно истинное положение оси и мы можем сравнить его с положением, определенным программой. Проведенный таким образом анализ показал, что *программа 1* дает меньшую ошибку локации оси, чем *программа 2*. При этом *программа 2* несколько быстрее обрабатывает массив данных. Подробнее о сделанном анализе рассказано в Главе 4.

В итоге, программа, написанная на основе симплекс-метода, лучше всего подходит для обработки данных больших установок, где крайне важно быстрое действие (из-за огромных массивов данных), а программа на основе прямого поиска лучше подходит для обработки данных небольших установок, где локация оси сложнее. На данный момент данные установок PRISMA-YBJ и PRISMA-32 обрабатываются *программой 1*, а для будущей установки PRISMA-LHAASO, вероятно, уже будет использоваться *программа 2*.

Таким образом, были обработаны следующие массивы данных.

1) Данные с установки PRISMA-YBJ, полученные за период с 1 сентября 2013 года по 31 марта 2016 года. Общее число зарегистрированных событий составило более 1.5 млн. В связи со сложностью локации оси небольшой установкой отбирались только события, в которых сработали все 4 детектора с амплитудой не менее 2-х каналов АЦП (~ 5 MIP). Число таких событий составило около 800 тыс.

2) Данные с установки PRISMA-32 за период с 1 февраля 2012 года по 31 марта 2016 года. Общее число событий составило около 80 тыс. Для достижения хорошей точности локации оси выбирались события, в которых сработало не меньше 8 детекторов с амплитудой не менее 2-х каналов АЦП (~10 MIP). Число таких событий составило около 30 тыс. событий.

### ***3.2. Функции пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ.***

Изучение функций пространственного распределения электромагнитной компоненты широких атмосферных ливней на сегодняшний день проведено уже на многих установках, расположенных на разных высотах в разных частях земного шара. В частности, ФПР электромагнитной компоненты уже измерена на уровне моря (~150 м над уровнем моря) на установках ШАЛ МГУ и KASCADE [51, 52], а на высоте 4300 м на установке ARGO-YBJ [53]. Поэтому такие измерения на наших

прототипах PRISMA-32 и PRISMA-YBJ носят методический характер и позволяют косвенно проверить правильность работы установок в части регистрации электромагнитной компоненты ШАЛ. При этом для PRISMA-YBJ был проведен совместный с ARGO-YBJ калибровочный сеанс, позволивший получить абсолютную калибровку по э-м компоненте [50].

На рис. 30 показана ФПП электромагнитной компоненты по данным установки PRISMA-YBJ, также на рис приведены нормальная для этой высоты НКГ-функция с возрастом 1.1 и радиусом Мольера 136 м и фит экспериментальных данных установки ARGO-YBJ из работы [53].

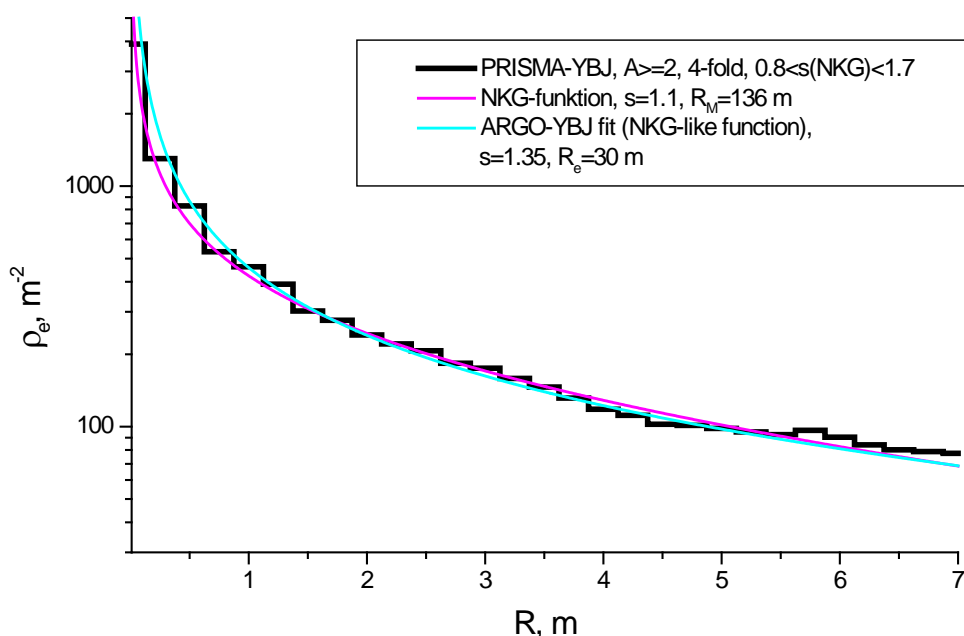


Рис. 30. ФПП электромагнитной компоненты ШАЛ для установки PRISMA-YBJ:

*гистограмма – экспериментальные точки*

*сиреневая кривая – фит экспериментальных данных ARGO-YBJ из работы [53]*

*бирюзовая кривая – НКГ-функция для высоты 4300 м с возрастом 1.1*



Видно, что ФПР, измеренная на установке PRISMA-YBJ, хорошо совпадает с функцией, измеренной на установке ARGO-YBJ, в пределах 6 метров. Это объясняется плохой локацией оси, расположенной за пределами установки (радиус установки 5 м). Также измеренная ФПР неплохо согласуется с нормальной НКГ-функцией с радиусом Мольера = 136 м и возрастом 1.1.

На рис. 31 показана ФПР электромагнитной компоненты ШАЛ, измеренная на установке PRISMA-32 на уровне моря. Также на рис. 31 приведена НКГ-функция с возрастом 0.95 и радиусом Мольера 90 м.

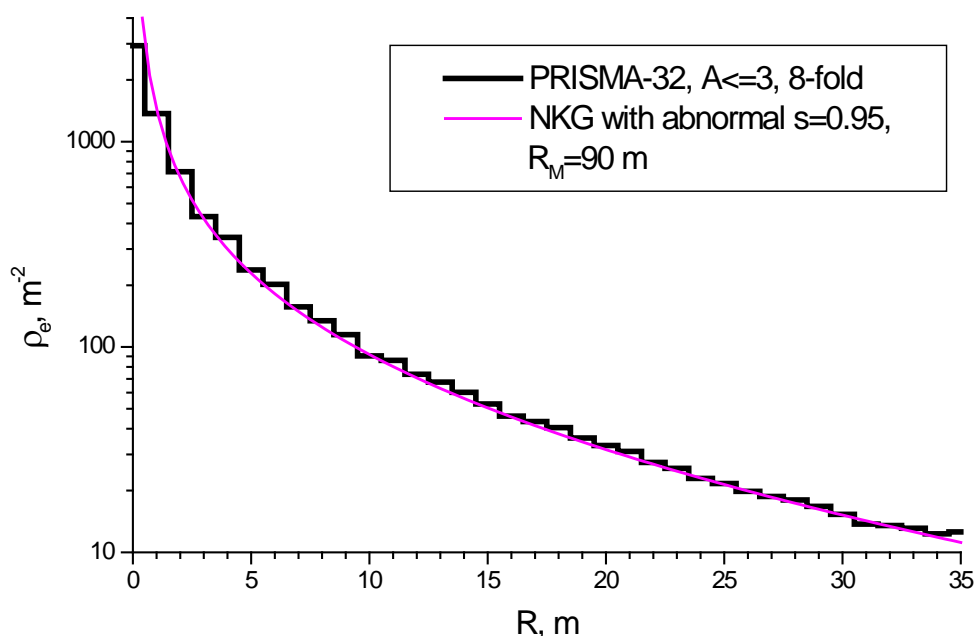


Рис. 31. ФПР электромагнитной компоненты ШАЛ для установки PRISMA-32:

гистограмма – экспериментальные точки

фиолетовая кривая – НКГ-функция с возрастом 0.95

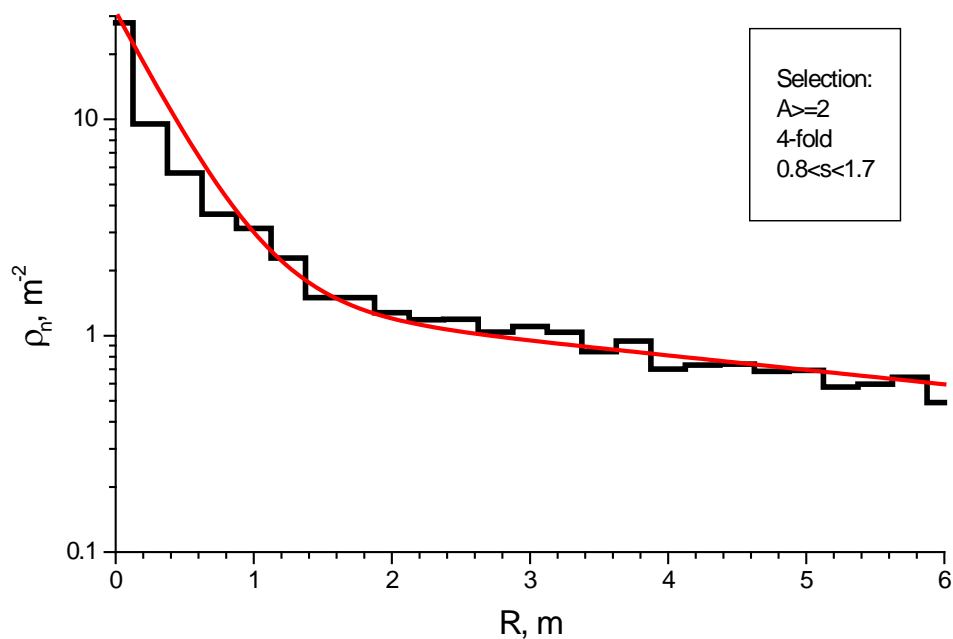
Видно, что экспериментальная зависимость хорошо описывается представленной НКГ-функцией. При этом возраст 0.95 является слишком низким для уровня моря. По результатам работ, выполненных на установках ШАЛ МГУ в Москве и KASCADE в Карлсруэ, он равняется 1.2-1.3. Предполагается, что маленький возраст объясняется толстой бетонной крышей (~ 12 см бетона), которая поглощает низкоэнергичную электромагнитную компоненту и за счет этого сужает и «омолаживает» ливни. Подробнее этот вопрос рассмотрен в главе Моделирование эксперимента.

### ***3.3. Функции пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ.***

В отличие от электромагнитной компоненты, измерявшейся на многих установках, функция пространственного распределения вторичных тепловых нейтронов в ШАЛ была впервые получена на установках PRISMA-YBJ и PRISMA-32 в ходе выполнения данной работы.

На рис. 32 показана ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ, построенная по данным установки PRISMA-YBJ. Экспериментальные данные хорошо описываются суммой двух экспонент с параметрами 0.35 м и 6.5 м:

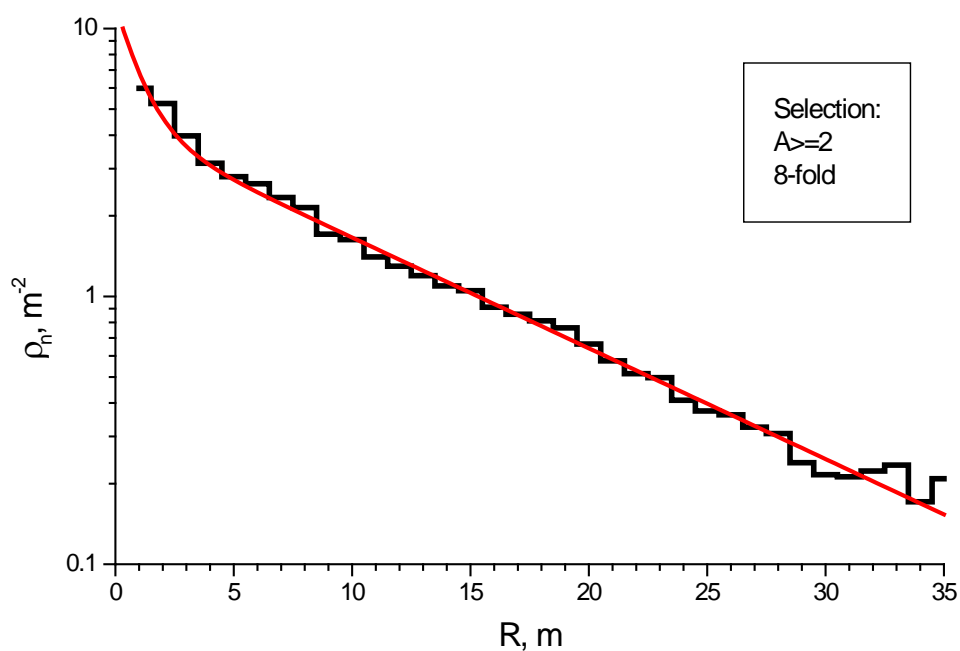
$$F(R) = 30 * e^{-R/0.35} + 1.5 * e^{-R/6.5}$$



*Рис. 32. ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ по данным установки PRISMA-YBJ.*

На рис. 33 показана ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ, построенная по данным установки PRISMA-32 [54]. Экспериментальные данные хорошо описываются суммой двух экспонент с параметрами 1 м и 10.5 м:

$$F(R) = 8 * e^{-R/1} + 4.3 * e^{-R/10.5}$$



*Рис. 33. ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ по данным установки PRISMA-32.*

### **3.4. Распределение широких атмосферных ливней по числу нейтронов.**

Как уже было сказано в главе Введение одним из необъясненных и неподтвержденных экспериментальных фактов на сегодняшний день является спектр ШАЛ по числу адронов. На рис. 4 были приведены спектры ШАЛ по числу адронов, измеренные на большом адронном калориметре установки KASCADE. На сегодняшний день это самое позднее и точное измерение адронной компоненты.

Поскольку вторичные тепловые нейтроны в ШАЛ создаются преимущественно высокоэнергичными адронами ливня, спектр ШАЛ по

числу нейтронов должен иметь тот же наклон, что и спектр по числу родительских адронов.

По результатам измерений были построены спектры ШАЛ по числу нейтронов на двух высотах над уровнем моря. Они показаны на рис. 34 (для установки PRISMA-YBJ) и на рис. 35 (для установки PRISMA-32). Видно, что экспериментальные точки для обеих установок хорошо описываются степенной зависимостью с интегральным показателем  $1.95 \pm 0.05$ .

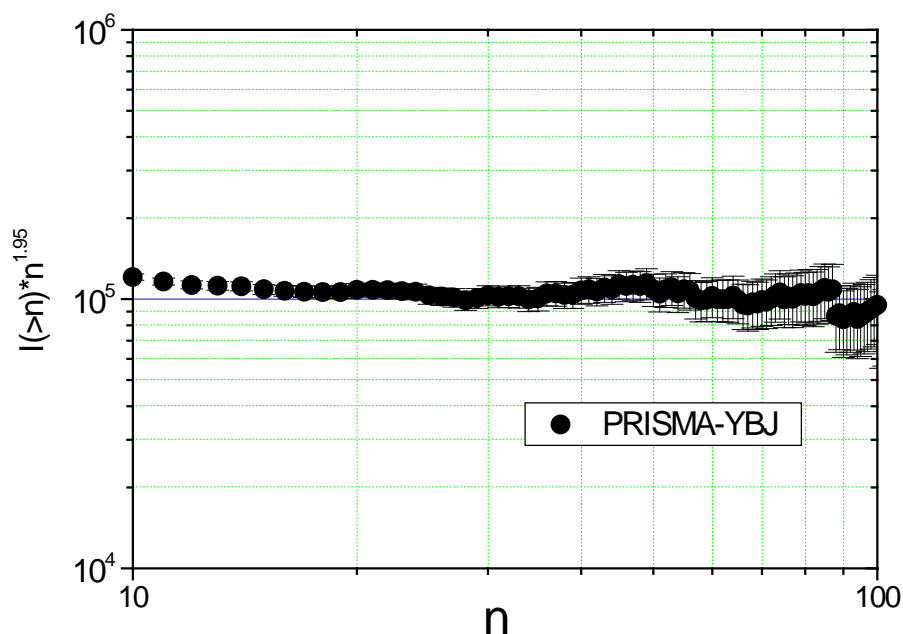
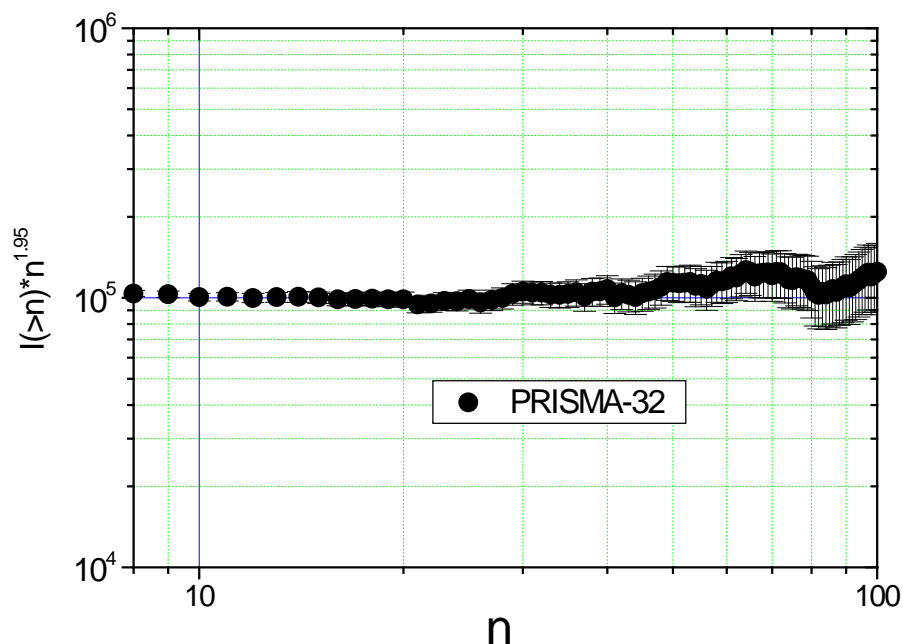


Рис. 34. Распределение ШАЛ по числу нейтронов по данным установки PRISMA-YBJ.

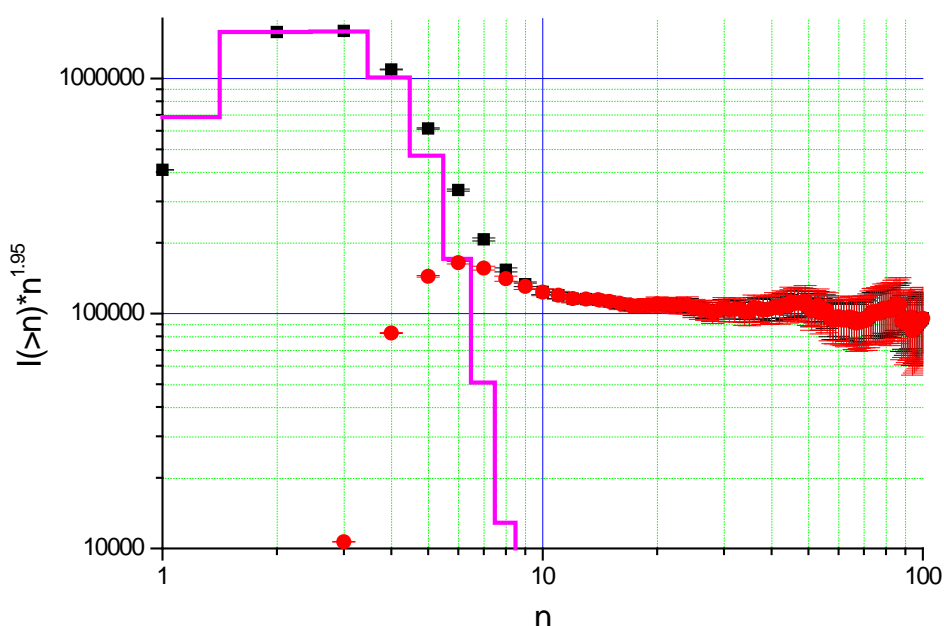


*Рис. 35. Распределение ШАЛ по числу нейтронов по данным установки PRISMA-32*

На приведенных выше рисунках показаны спектры ШАЛ по числу нейтронов в диапазоне от 8 до 100 нейтронов для Москвы [55] и от 10 до 100 нейтронов для Тибета. Это объясняется наличием фоновых импульсов от тепловых нейтронов, а также от заряженных частиц и шумовых импульсов. На рис. 36 черными точками показан спектр ШАЛ в диапазоне от 1 до 100 нейтронов на Тибете. Гистограммой наложено распределение Пуассона со средним 1.5 (это близко к среднему значению числа фоновых импульсов в установке на один ливень). Красными точками показан спектр после вычитания указанного пуассоновского распределения. Стоит также отметить, что фон имеет различные вариации (например сезонные), о

которых подробнее будет сказано в Главе 5. Следовательно, такой фон нельзя точно описать простым распределением Пуассона.

Таким образом, на основе полученных экспериментальных данных мы можем сделать вывод о том, что измеренный спектр по числу нейтронов совпадает по наклону с опубликованным в работе [17] спектром ШАЛ по числу адронов, что косвенно подтверждает полученные результаты.



*Рис. 36. Распределение ШАЛ по числу нейтронов по данным установки PRISMA-YBJ:*

*Черные квадраты – экспериментальное распределение как оно есть.*

*Гистограмма – фон распределенный по пуассоновскому закону со средним значением 1.5.*

*Красные круги – экспериментальное распределение после вычета фона.*

## **Глава 4. Моделирование экспериментов.**

Изучение адронной компоненты ШАЛ методом регистрации тепловых нейтронов, рождаемых адронами ливня в веществе рядом с

детекторами, является новым методом. Поэтому для его полноценного использования необходимо было провести адекватное моделирование эксперимента и сравнить полученные результаты с данными существующих прототипов.

Для моделирования использовались пакеты программ CORSIKA (вер. 6.9) и GEANT4.10, которые наиболее часто используются для моделирования экспериментов по исследованию ШАЛ и положительно зарекомендовали себя в этой области. Кроме того, они удобны для освоения, так как содержат подробную сопроводительную документацию (на сайтах CERN и KIT), и имеют форумы поддержки (основной на сайте Стэнфордского университета), на которых оперативно разбираются возникающие вопросы и устраняются выявленные в пакетах программ ошибки.

#### ***4.1. Общая схема моделирования.***

Проведенное в настоящей работе моделирование включает в себя три части.

Первая часть – это моделирование широких атмосферных ливней при помощи пакета CORSIKA6.9. На входе задается тип первичной частицы, первичная энергия (или энергетический спектр и пределы), диапазон углов, уровень наблюдения (высота в метрах над уровнем моря), пороги обрезания по энергиям для наблюдаемых частиц. На выходе



получается файл, содержащий описание всех частиц с энергиями выше пороговых на уровне наблюдения. Описание включает в себя тип частицы, энергию (импульс) и координаты.

Вторая часть – это моделирование отклика детекторов на различные частицы ШАЛ с использованием пакета GEANT4.10. Для этого в среде GEANT4 задается геометрия установки и окружения, химический состав материалов, а различные частицы с различными энергиями бросаются непосредственно над установкой (в нашем случае на крыши зданий). Таким способом вырабатываются общие правила отклика детекторов установки (с учетом крыши здания) на частицы ливня в зависимости от её типа, энергии и начальных координат.

Третья часть – это программа, написанная на языке Fortran, которая считывает файлы с ливнями, полученные на выходе CORSIKA, моделирует отклик установки на ливень и записывает результат в выходной файл. В программу заложены правила выработанные в GEANT4, а также в ней заложены триггерные условия, соответствующие эксперименту. Кроме того, в программе учтена полученная экспериментальным путем калибровка детекторов по электромагнитной и нейтронной компонентам (см. предыдущие главы). Выходной файл имеет такой же формат, что и реальные экспериментальные данные, и далее модельные данные обрабатываются так же, как и экспериментальные, той же программой.

#### **4.2. Моделирование в CORSIKA6.9.**

Пакет программ CORSIKA (Cosmic Ray Simulations for KASCADE) был разработан в технологическом институте Карлсруэ коллаборацией эксперимента KASCADE для моделирования широких атмосферных ливней [56]. Проект оказался очень успешным и полученные с его помощью результаты, после исправления ошибок ранних версий, дали хорошее согласие с экспериментом. На сегодняшний день моделирование в CORSIKA осуществляют коллаборации практически всех экспериментов по изучению ШАЛ. Во многом этому способствует продолжающееся активное развитие проекта, разработка и уточнение моделей взаимодействий и поддержка пользователей. Программа CORSIKA полностью моделирует развитие атмосферного ливня, позволяет задавать атомный номер первичной частицы, энергетический спектр, диапазон углов прихода ливня, высоту наблюдения, пороги наблюдения по энергии для различных частиц ливня. Пороги при этом ограничены следующими значениями: гамма-кванты, электроны/позитроны - 50 КэВ, мюоны - 0.5 ГэВ, адроны – 50 МэВ. Кроме того в программе есть возможность включить так называемый “thining”, то есть считать не каждую частицу в ливне, а каждую N-ю частицу, для ускорения расчетов при очень высоких энергиях  $E_0 \geq 10^{17}$ .

#### **4.2.1. Модели.**

Для решения наших задач были выбраны модели QGSJET-II.03 [57] (для высокоэнергичных взаимодействий) и GHEISHA 2002 [58] (для более низких энергий). Данные модели широко используются в моделировании широких атмосферных ливней в течении уже долгого времени и дают удовлетворительные результаты. Стоит отметить, что, несмотря на большое количество конкурирующих между собой моделей существующих сегодня, авторы различных работ не сходятся во мнениях относительно однозначного превосходства той или иной модели при сравнении результатов с экспериментальными данными. Более того, когда речь идет о первичных энергиях в районе ПэВа, по основным распределениям (по числу электронов, по возрастам, пространственные распределения) предсказания разных моделей дают схожие результаты.

В данной работе моделирование, главным образом, предназначено для проверки адекватности полученных экспериментально результатов и в работе отсутствует наблюдение каких-либо тонких и экзотических эффектов. Поэтому выбор модели проводился исключительно на основе опубликованного в литературе положительного опыта их использования для моделирования экспериментов по изучению ШАЛ.

#### **4.2.2. Энергетические диапазоны и количество ливней.**

Моделирование атмосферных ливней проводилось для первичных протонов, ядер железа и гамма-квантов и для двух уровней наблюдения:

170 м и 4300 м (для установок PRISMA-32 и PRISMA-YBJ соответственно). Для 170 м энергетические диапазоны моделируемых протонов и гамма-квантов начинаются с 300 ТэВ, а ядер железа с 1 ПэВ. Для 4300 м порог для протонов был выбран на уровне 30 ТэВ, для гамма-квантов – 10 ТэВ, а для ядер железа 300 ТэВ. Сверху для всех уровней наблюдения энергии ограничены 300 ПэВ. Энергетический спектр первичных частиц падает достаточно быстро, поэтому для набора адекватной статистики на всех рассматриваемых энергиях требуется разбить исследуемый диапазон на интервалы размером в 1-1.5 порядка по  $E_0$ , что и было сделано. Ниже представлена таблица 4, в которой указано число разыгранных в CORSIKA ливней и число их бросаний на установки для прототипов PRISMA-32 и PRISMA-YBJ, расположенных на высотах 170 и 4300 м над уровнем моря соответственно.

Табл.4. Интервалы по первичной энергии для моделируемых  $p$  и  $Fe$ .

<i><b>H, м</b></i>		<i><b>Интервалы для p, ПэВ</b></i>			
<i><b>170</b></i>	-	<i><b>0.3-10</b></i>	<i><b>10-30</b></i>	<i><b>30-100</b></i>	<i><b>100-300</b></i>
<i><b>кол-во разыгранных ливней</b></i>	-	700	20	20	20
<i><b>кол-во бросаний</b></i>	-	$10^6$	$10^4$	$10^2$	$10^2$
<i><b>4300</b></i>	<i><b>0.03-1</b></i>	<i><b>1-10</b></i>	<i><b>10-30</b></i>	<i><b>30-100</b></i>	<i><b>100-300</b></i>
<i><b>кол-во разыгранных ливней</b></i>	1000	200	20	20	10
<i><b>кол-во бросаний</b></i>	$10^7$	$10^5$	$10^4$	$10^2$	$10^2$
		<i><b>Интервалы для Fe, ПэВ</b></i>			
<i><b>170</b></i>	-	<i><b>1-30</b></i>	<i><b>30-100</b></i>	<i><b>100-300</b></i>	

<i>кол-во разыгранных ливней</i>	-	400	20	20
<i>кол-во бросаний</i>	-	$10^5$	$10^3$	$10^2$
<i>4300</i>	<i>0.1-1</i>	<i>1-10</i>	<i>10-100</i>	<i>100-300</i>
<i>кол-во разыгранных ливней</i>	500	100	70	10
<i>кол-во бросаний</i>	$10^7$	$10^5$	$10^4$	$10^2$

Поскольку детальное (без функции “thining”) моделирование большого количества ливней требует длительного времени, особенно на высоких энергиях, на данный момент была обеспечена только минимальная необходимая для проведения сравнения с экспериментом статистика.

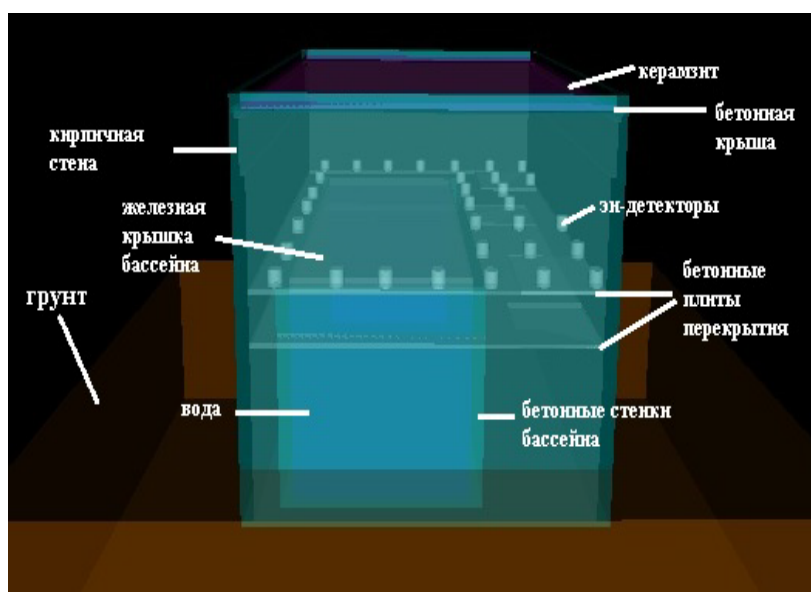
Моделирование ливней для обоих уровней наблюдения проводилось для первичных частиц с углами прихода от 0 до 45 градусов.

### **4.3. Моделирование в GEANT4.10.**

#### **4.3.1. Геометрия.**

GEANT4 используется для детального моделирования прохождения частиц через конкретную установку, с учетом конкретной геометрии, окружающих материалов и условий работы детекторов. На рис. 37 показан вид установки PRISMA-32, полученный в процессе работы программы в GEANT4. Заложенная в пакете программ функция визуализации геометрии, позволяет избежать случайных ошибок при описании пространства. На рис. 37 видны внешние стены здания, крыша, бетонный

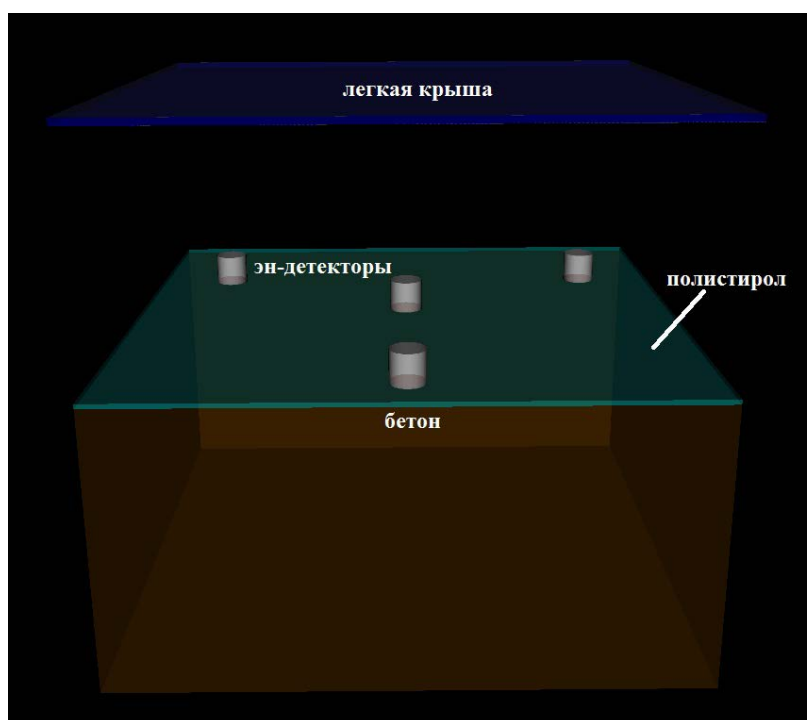
пол четвертого этажа, на котором находится установка, бассейн, бетонные стены бассейна, стальная крышка бассейна и др.



*Рис. 37. Геометрия установки PRISMA-32, как она заложена в GEANT4.10.*

Для экспериментов с тепловыми нейтронами и, в частности, для нашего эксперимента детальное описание материалов и геометрии очень важно. Адроны, которые идут в составе широкого атмосферного ливня, проходя через вещество, рождают испарительные нейтроны. Особенно интенсивно этот процесс происходит в плотных и в тяжелых веществах. В нейтронных мониторах специально для этой цели используется свинец. В нашем случае такими материалами являются бетон (крыша, плиты перекрытия, стенки бассейна) и кирпич (стены). Кроме того большое значение имеет бассейн с водой, так как вода эффективно замедляет и поглощает нейтроны.

На рис. 38 показана заложенная в GEANT4 геометрия установки PRISMA-YBJ, а также фото ангара ARGO-YBJ снаружи.



*Рис. 38. Геометрия установки PRISMA-YBJ, как она заложена в GEANT4.10*

Этот наш прототип расположен в легком ангаре, построенном для установки ARGO-YBJ, 4 эн-детектора установлены поверх плоских детекторов ARGO. Таким образом, на Тибете мы имеем следующий набор материалов.

- 1) Ангар имеет легкую крышу, которая состоит из 8 см вспененного полистирола между двумя полумиллиметровыми стальными листами.
- 2) Непосредственно под крышей расположены опорные стальные балки толщиной в 3 мм. В реальности они образуют сетку, покрывающую

10% площади крыши, но в данной работе для упрощения они были представлены как равная по весу сплошная стальная поверхность.

3) Под нашими детекторами находятся Пады (“BigPad”) ARGO-YBJ, состоящие преимущественно из пластика. Здесь для упрощения они были заданы как сплошной слой полиэтилена.

4) Пол представляет собой бетонная стяжку, под которой расположены фундамент и далее грунт. Поскольку состав грунта и форма фундамента точно неизвестны, все выше перечисленное было задано как сплошной слой бетона, толщиной 10 м, что по своему химическому составу вероятно вполне соответствует реальности (за исключением грунтовых вод).

Сцинтиллятор в обоих экспериментах был задан как смесь ZnS (60%) и LiF(40%), при этом Li задан как смесь изотопов  ${}^7\text{Li}$  (10%) и  ${}^6\text{Li}$  (90%). Корпус – полиэтиленовая труба, перекрытая плоскостями сверху и снизу, толщина всех стенок 8 мм. Моделирование непосредственно отклика детектора не производилось (считалось число нейтронов провзаимодействовавших в сцинтилляторе и энерговыделение в нем от заряженных частиц), поэтому ФЭУ и светотражающий конус не были заложены в описание геометрии.

#### **4.3.2. Модели.**

Использовался набор стандартных моделей, которые используются для детального описания ШАЛ на уровне наблюдения, и для



взаимодействий нейтронов низких энергий: QGSP (адроны с энергиями в диапазоне от 10 ГэВ до 100 ТэВ), ВИС (адроны с энергиями ниже 10 ГэВ) и НР (нейтроны с энергиями ниже 20 МэВ, включая тепловые).

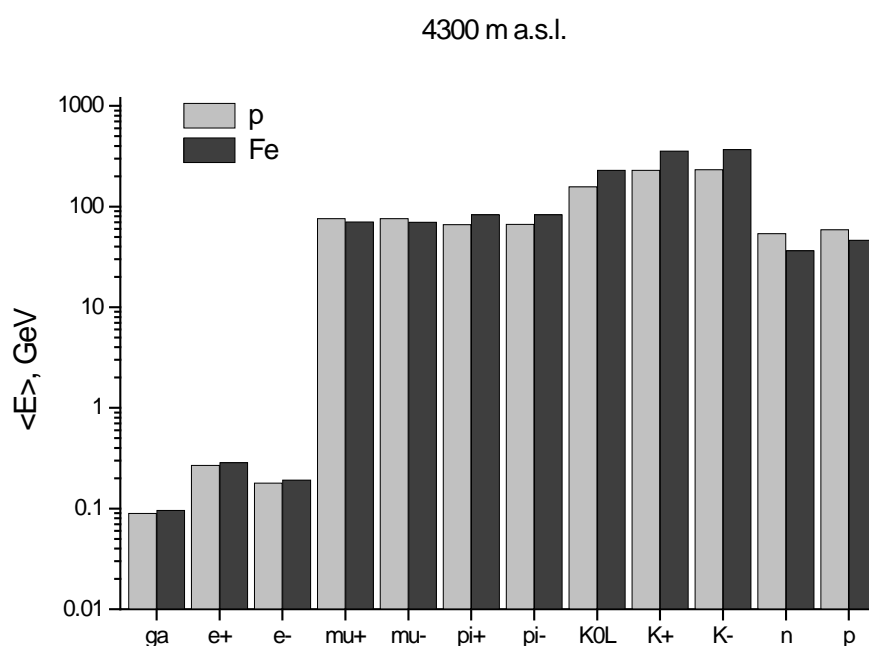
В процессе моделирования для каждой установки частицы (адроны, электроны, мюоны и гамма-кванты) бросались непосредственно на крышу здания.

#### ***4.4. Результаты моделирования.***

##### **4.4.1. Зависимость энерговыделения в детекторах установок от энергии заряженных частиц и гамма-квантов.**

При помощи пакета GEANT4.10 была получена зависимость среднего энерговыделения в детекторе от энергии падающей частицы. Частицы бросались на крышу соответствующего здания (ангар ARGO или здание ЭК НЕВОД) непосредственно над центром эн-детектора. Зависимости были получены для электронов, гамма-квантов, мюонов, пионов протонов и нейтронов. В эксперименте импульс от электромагнитной компоненты ШАЛ регистрируется в течение одной первой микросекунды после срабатывания триггера. При этом небольшой вклад здесь дают и заряженные адроны (хотя их число более чем на два порядка меньше числа электронов) и нейтроны, которые успели термализоваться и захватиться в сцинтилляторе в течение 1 мкс либо дали протон отдачи. Вероятность термализации и захвата нейтрона в первую

микросекунду очень мала, однако энерговыделение в случае захвата нейтрона на 2 порядка больше чем 1 МIP. Но в целом, конечно, общий вклад адронов в энерговыделение в установке при приходе ШАЛ крайне незначителен из-за малого числа. Предварительно в CORSIKA6.9 были получены средние энергии различных частиц в ливне на уровне наблюдения. Для Тибета данные приведены на рис. 39.



*Рис. 39. Средние энергии различных частиц в ливне на уровне наблюдения по результатам моделирования в CORSIKA6.9 для высоты 4300 м для первичных протонов и ядер железа.*

Полученные в итоге в GEANT4.10 зависимости энерговыделений в детекторах установки от энергии падающих частиц приведены на рис. 40, 41 и (для Тибета) и на рис. и 42, 43 (для Москвы).

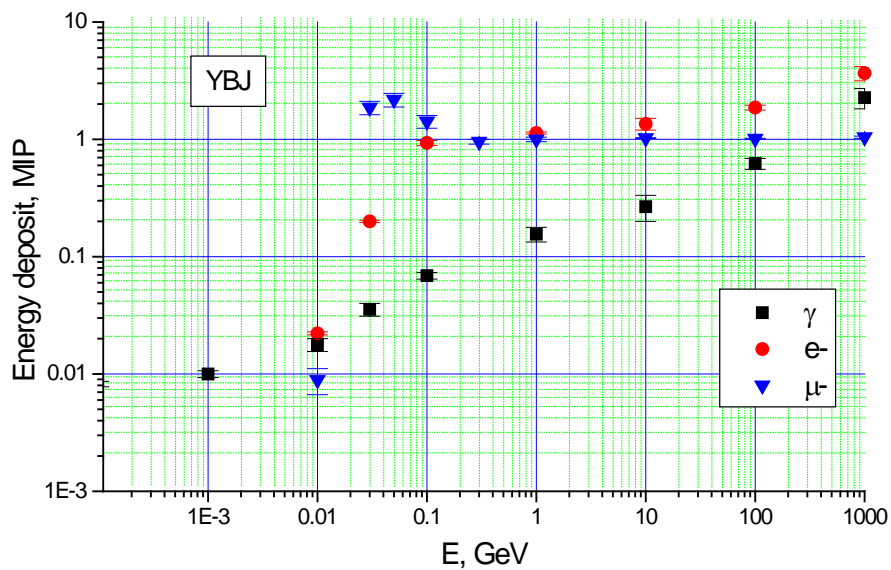


Рис. 40. Энерговыведение в эн-детекторах установки PRISMA-YBJ в зависимости от энергии частицы брошенной над крышей ангара над центром детектора (для лептонов и гамма-квантов, моделирование в GEANT4.10). MIP – энерговыведение от мюона с энергией 1 ГэВ.

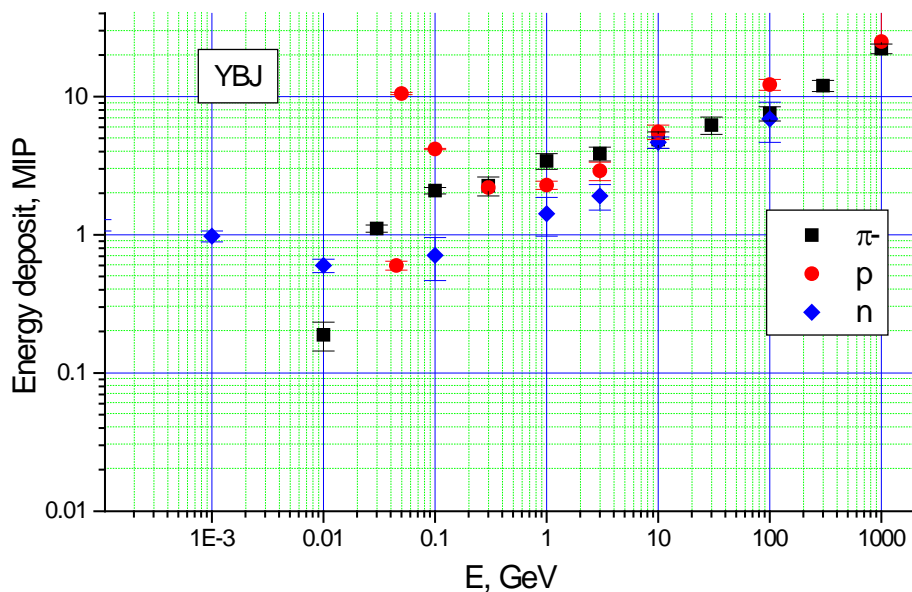


Рис. 41. Энерговыведение в эн-детекторах установки PRISMA-YBJ в зависимости от энергии частицы брошенной над крышей ангара над центром детектора (для адронов, моделирование в GEANT4.10). MIP – энерговыведение от мюона с энергией 1 ГэВ.

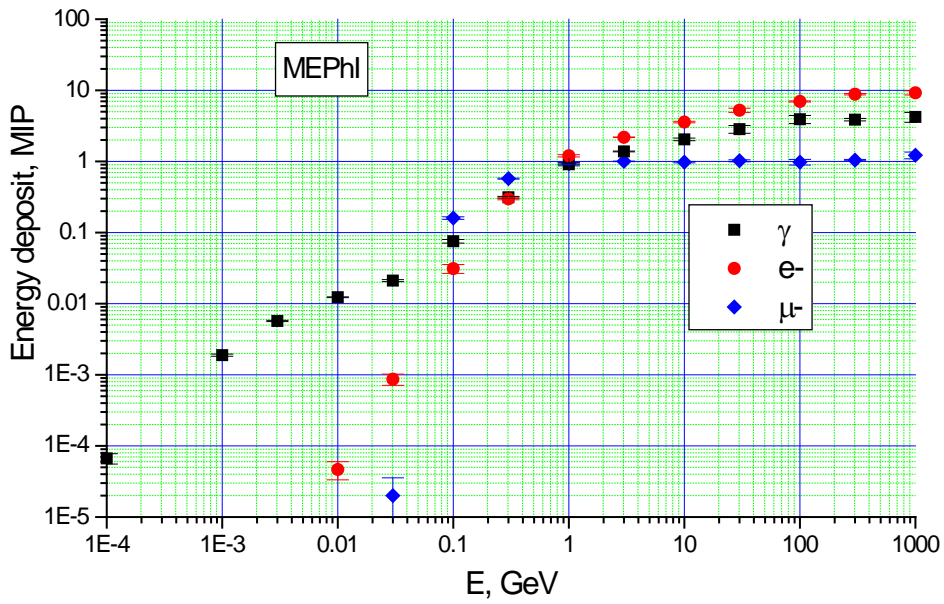


Рис. 42. Энерговыведение в эн-детекторах установки PRISMA-32 в зависимости от энергии частицы брошенной над крышей ЭК НЕВОД над центром детектора (для лептонов и гамма-квантов, моделирование в GEANT4.10). MIP – энерговыведение от мюона с энергией 1 ГэВ.

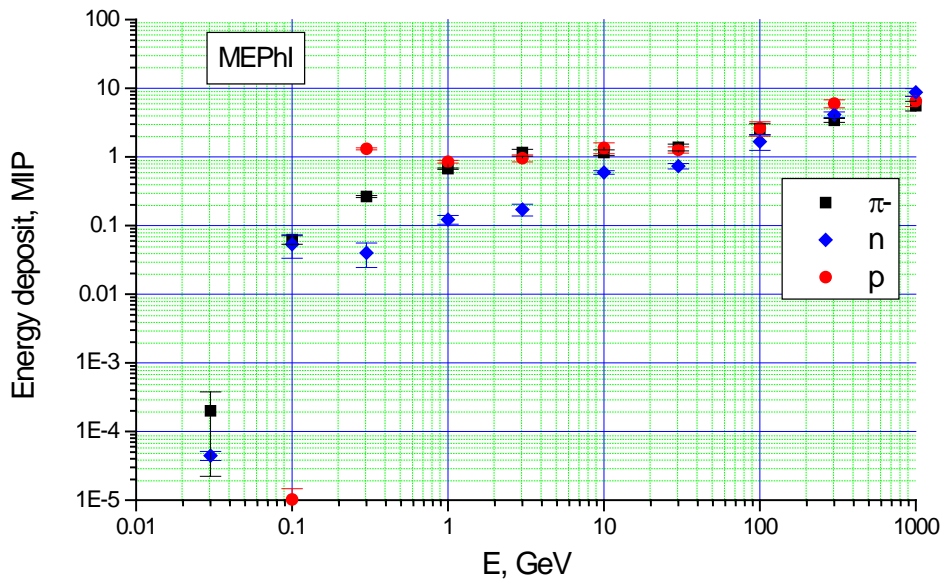


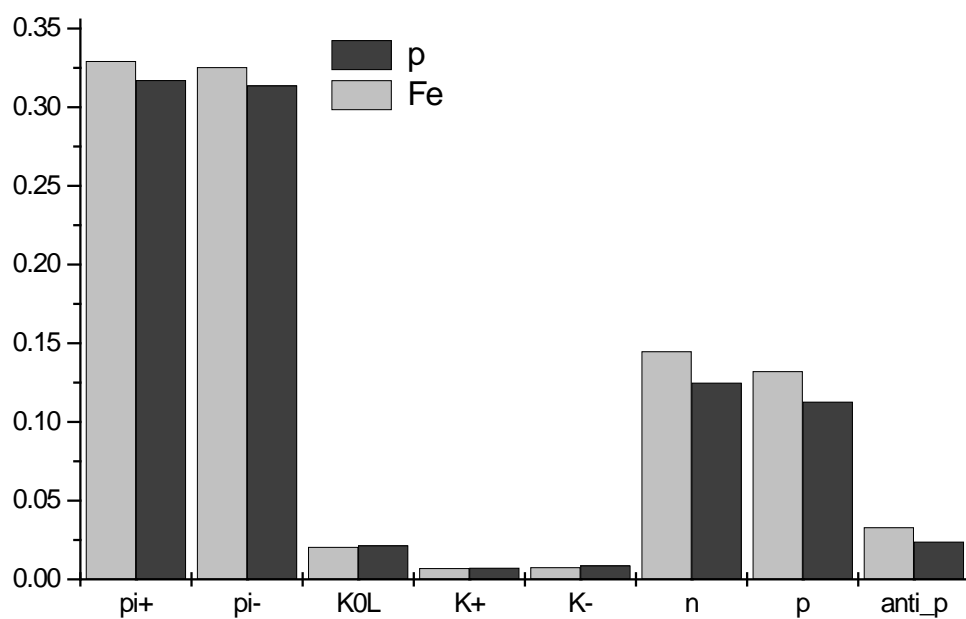
Рис. 43. Энерговыведение в эн-детекторах установки PRISMA-32 в зависимости от энергии частицы брошенной над крышей ЭК НЕВОД над центром детектора (для адронов, моделирование в GEANT4.10). MIP – энерговыведение от мюона с энергией 1 ГэВ.

Видно, что резкое падение энерговыделения при уменьшении энергии электронов и мюонов в Москве происходит при больших энергиях ( $\sim 0.5-1$  ГэВ) чем на Тибете ( $\sim 0.1$  ГэВ). Причиной тому более толстая крыша в МИФИ ( $\sim 25$  г/см<sup>2</sup>), в которой происходит поглощение частиц. Поскольку средние энергии электронов в ливне составляют порядка 100 МэВ, мы теряем в Москве значительную часть электромагнитной компоненты, что приводит к «омоложению» ливня, показанному в Главе 3.

Все полученные здесь зависимости были в последующем заложены в основную программу моделирования.

#### **4.4.2. Зависимость числа зарегистрированных нейтронов от энергии «родительских» адронов.**

В ходе моделирования в GEANT4 была получена зависимость числа зарегистрированных тепловых нейтронов от энергии адрона, брошенного на детектор, расположенный на грунте. В данном случае адроны закладывались как смесь соответственно их средней доле в ливне на уровне наблюдения (показано на рис. для 4300 м). То есть, например, в статистике из 100000 событий  $\sim 32000$  – это  $\pi^+$ , 32000 –  $\pi^-$ , и т. д. Данное соотношение было получено в ходе моделирования ШАЛ в CORSIKA. Оно показано на рис. 44.



*Рис. 44. Доля различных адронов в ливне для первичных протонов и ядер железа (моделирование в CORSIKA).*

Полученная в результате зависимость числа зарегистрированных нейтронов от энергии «родительского» адрона показана на рис. 45.

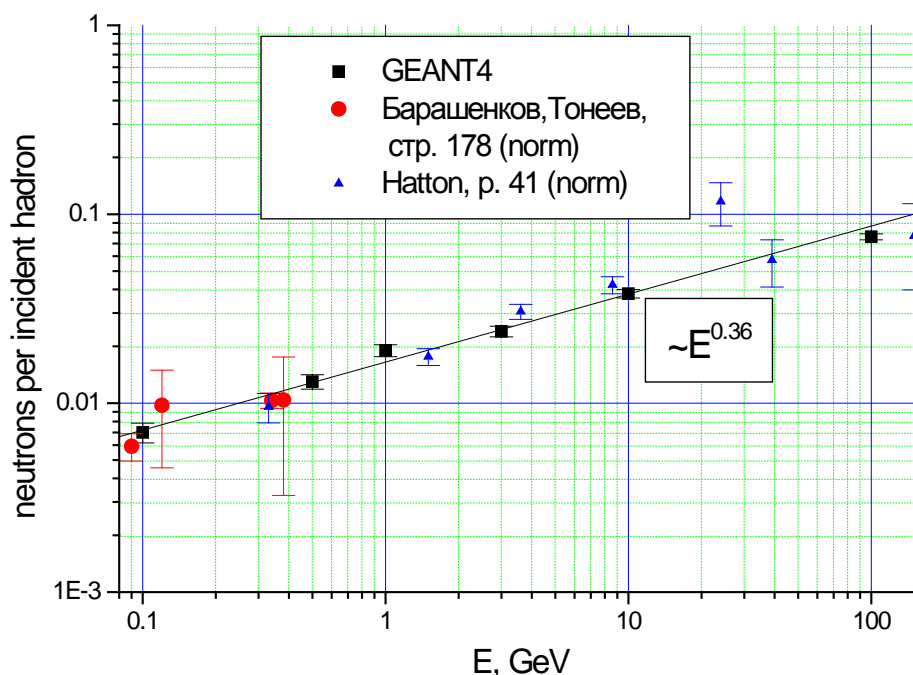


Рис. 45. Зависимость числа зарегистрированных тепловых нейтронов от энергии адрона:

черные квадраты - по результатам моделирования в GEANT4.10.

красные точки – моделирование для протонов из работы [59]

синие треугольники – экспериментальная работа на нейтронном мониторе с магнитным спектрометром из работы [60] (точки нормированы)

Моделирование проведено в диапазоне энергий от 100 МэВ до 100 ГэВ. Полученная зависимость хорошо описывается степенной функцией с показателем 0.36. Для сравнения приведены нормированные данные выхода нейтронов из свинца нейтронного монитора в зависимости от энергии падающего адрона. Красные точки – моделирование из работы [59], синие – эксперимент [60] (в Лидсе нейтронный монитор был помещен под магнитным спектрометром, измерявшим энергию падающих на монитор протонов). Видно хорошее согласие приведенных результатов с

расчетом, сделанным в данной работе. Можно также сказать, что рост числа зарегистрированных нейтронов с ростом энергии падающего адрона относительно слабый, а, следовательно, пропорциональность числа нейтронов числу адронов меньше подвержена статистическим флуктуациям за счет энергии адронов.

#### **4.4.3. Функция пространственного распределения зарегистрированных нейтронов относительно «родительских» адронов.**

Далее при помощи GEANT4 были получены функции пространственного распределения тепловых нейтронов относительно родительских адронов.

Адроны различных энергий (1, 10, 100 ГэВ) бросались на установку (было проделано для московской и тибетской установок) и бралось расстояние от траектории адрона до детекторов и считалось среднее число нейтронов на каждом расстоянии. Результаты для адронов с энергией 100 ГэВ приведены на рис. 46.



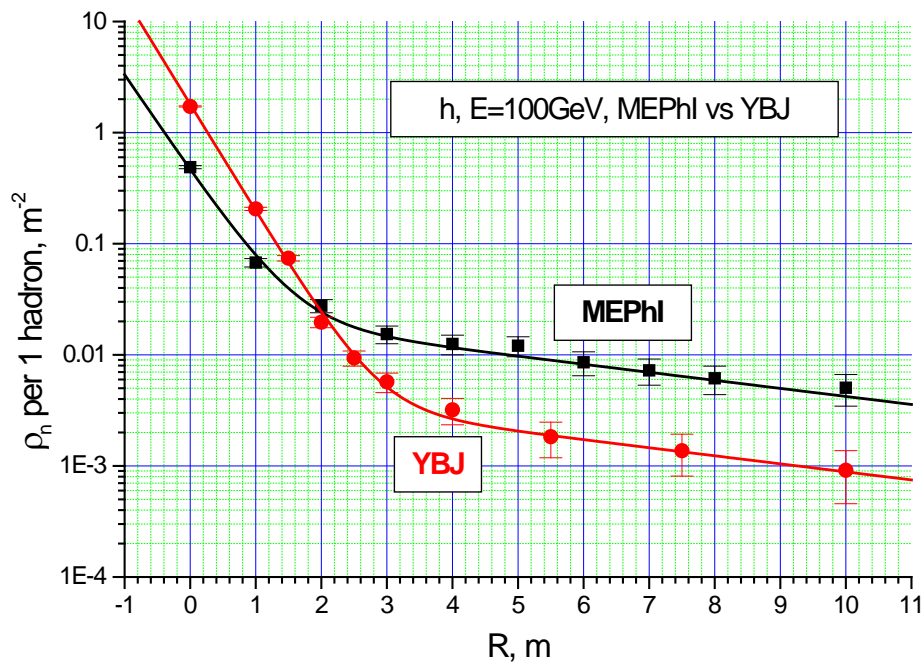


Рис. 46. Зависимость числа зарегистрированных тепловых нейтронов от расстояния до падающего адрона (по результатам моделирования в GEANT4.10 для адронов с энергией 100 ГэВ):

черные квадраты – моделирование для Москвы  
красные точки – моделирование для Тибета

Полученные ФПР хорошо описываются двойной экспоненциальной функцией, одна экспонента имеет параметр равный 0.45 м для YBJ и 0.5 м для Москвы, вторая – 6 м. Видно, что в YBJ коэффициент при первой экспоненте выше, чем в МИФИ, а при второй ниже. Было сделано предположение о связи этого параметра с толщиной крыши экспериментального зала. В Москве крыша бетонная, относительно «толстая» - 25 г/см<sup>2</sup>. На Тибете крыша «тонкая», ~ 1 г/см<sup>2</sup>. Поскольку полномасштабная установка PRISMA-LHAASO планируется под открытым небом, было проведено моделирование без крыши. Сравнение

нормированных ФПР тепловых нейтронов относительно родительских адронов (для адронов с энергией 1 ГэВ) для условий PRISMA-32, PRISMA-YBJ, PRISMA-LHAASO (высота 4300 м, на открытом воздухе) приведены на рис. 47. Также там приведена нормированная ФПР для адронов с энергией 100 ГэВ для YBJ. Видно, что по форме ФПР тепловых нейтронов от адронов с энергиями 1 ГэВ и 100 ГэВ практически совпадает при одинаковых внешних условиях.

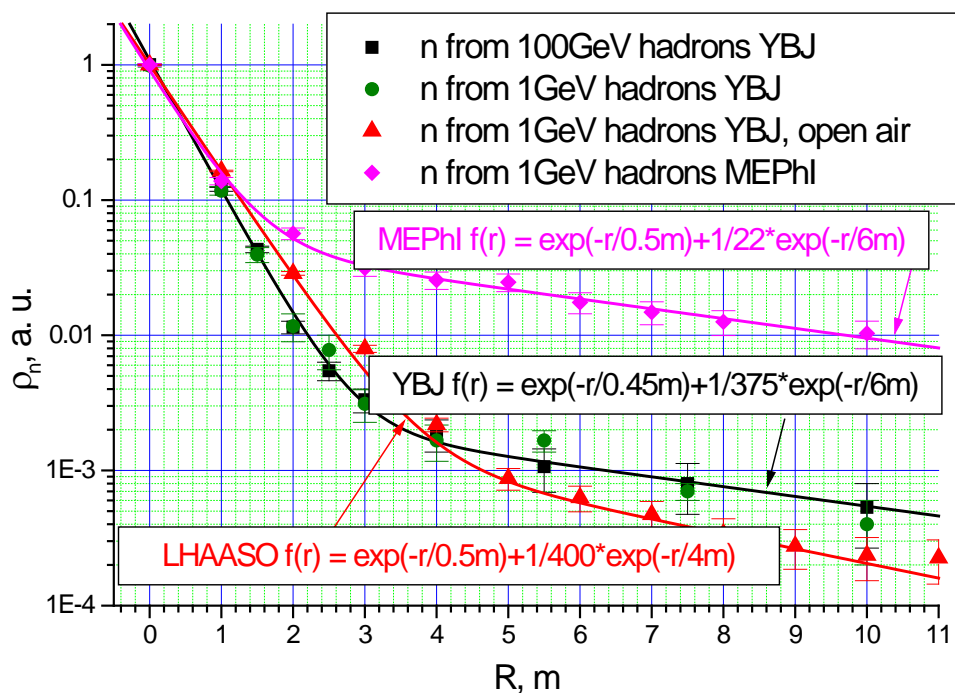


Рис. 47. Нормированные ФПР нейтронов относительно траектории родительских адронов для установок:

кружочки - PRISMA-32, адроны с энергией 1 ГэВ

квадраты - PRISMA-YBJ, адроны с энергией 100 ГэВ

треугольники - размещение детекторов под открытым небом на земле (PRISMA-LHAASO), адроны с энергией 1 ГэВ

ромбы - PRISMA-YBJ для адронов с энергией 1 ГэВ

При этом даже при полном отсутствии крыши более длинная экспонента не пропала полностью, хотя коэффициент при ней значительно уменьшился. Это позволяет говорить о наличии «атмосферных нейтронов», то есть нейтронов родившихся и/или термализовавшихся в воздухе.

Из рисунка видно, что чем тоньше крыша, тем уже ФПР нейтронов относительно адронов. При полном отсутствии крыши мы имеем функцию

$$F(x) = A * (\exp(-r/0.5m) + 1/400 * \exp(-r/4m)),$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от энергии адронов. Имея эту формулу мы можем посчитать среднее расстояние от траектории адрона ШАЛ до точки регистрации теплового нейтрона. Небольшое уширение первой экспоненты (с 0.45 м в YBJ до 0.5 м) связано, вероятно, с наличием пластика (RPC ARGO-YBJ) на полу в первом случае, а возможно и с наличием там грунтовых вод.

#### **4.4.4. Сравнение программ обработки результатов измерений.**

После проведения моделирования в GEANT4 полученные зависимости были заложены в программу, обрабатывающую файлы CORSIKA с насчитанными ливнями. Данная программа, написанная на языке Fortran, считывает смоделированные ливни (все частицы на уровне наблюдения с энергиями выше пороговых), и на основе полученных в GEANT4 зависимостей считает энерговыделение в детекторах и число зарегистрированных нейтронов. Далее она формирует выходной файл

полностью аналогичный тому, который записывается он-лайн программой в эксперименте. Далее эти файлы были обработаны двумя программами обработки результатов измерений, о которых уже говорилось в предыдущей главе. Эти программы условно называются *программа 1* и *программа 2* соответственно. Ниже приведено сравнение точности локации оси этими двумя программами, проведенное на основе обработки модельных данных.

На рис. 48 показано распределение событий по величине ошибки локации оси (в м) по результатам моделирования эксперимента PRISMA-YBJ. Графики приведены для нескольких наборов ливней от моноэнергичных протонов (0.3 ПэВ, 1 ПэВ, 3 ПэВ, 10 ПэВ) и помножены на различные коэффициенты для того, чтобы можно было их различить на одном графике.

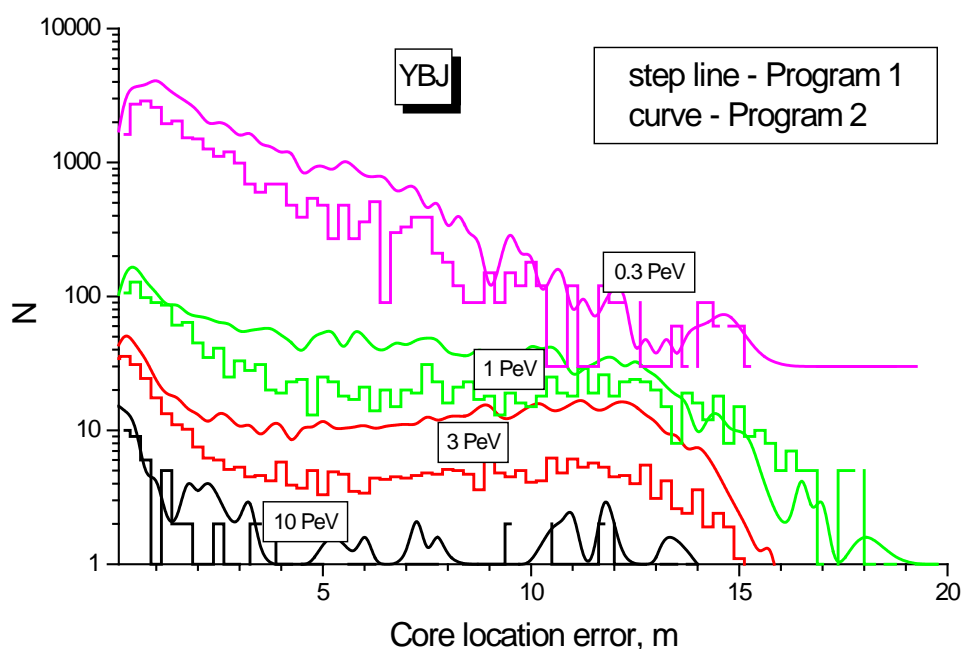


Рис. 48. Распределение событий по величине ошибки определения оси для установки PRISMA-YBJ, моделирование для различных энергий. Данные обрабатывались (гистограмма) – программой 1 и (гладкая линия) – программой 2.

При обработке данных московской установки программы 1 и 2 показали схожие результаты (рис. 49). Ошибка определения оси в эксперименте PRISMA-32 меньше чем в PRISMA-YBJ (нет длинного хвоста после 5 м) благодаря большому числу детекторов, при этом из-за нерегулярной сетки PRISMA-32 (детекторы окружают бассейн) ошибки все же достаточно велики.

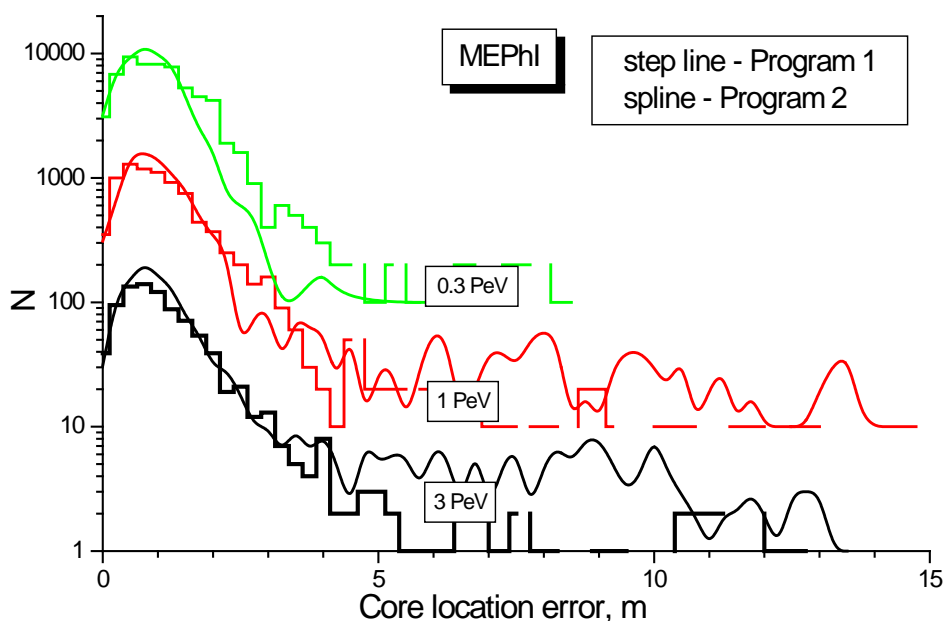


Рис. 49. Распределение событий по величине ошибки определения оси для установки PRISMA-32, моделирование для различных энергий. Данные обрабатывались (гистограмма) – программой 1 и (гладкая линия) – программой 2.

При этом и том и в другом случае программа 2 обрабатывает данные в  $\sim 3$  раза быстрее, что является небольшим преимуществом при работе с малым числом детекторов и неоспоримым при работе с большой установкой. Поэтому при работе с 400 детекторами мы планируем использовать программу 2.

На рис. 50. показана ошибка локации оси по результатам моделирования эксперимента PRISMA-YBJ для всех событий и для событий отобранных внутри установки.

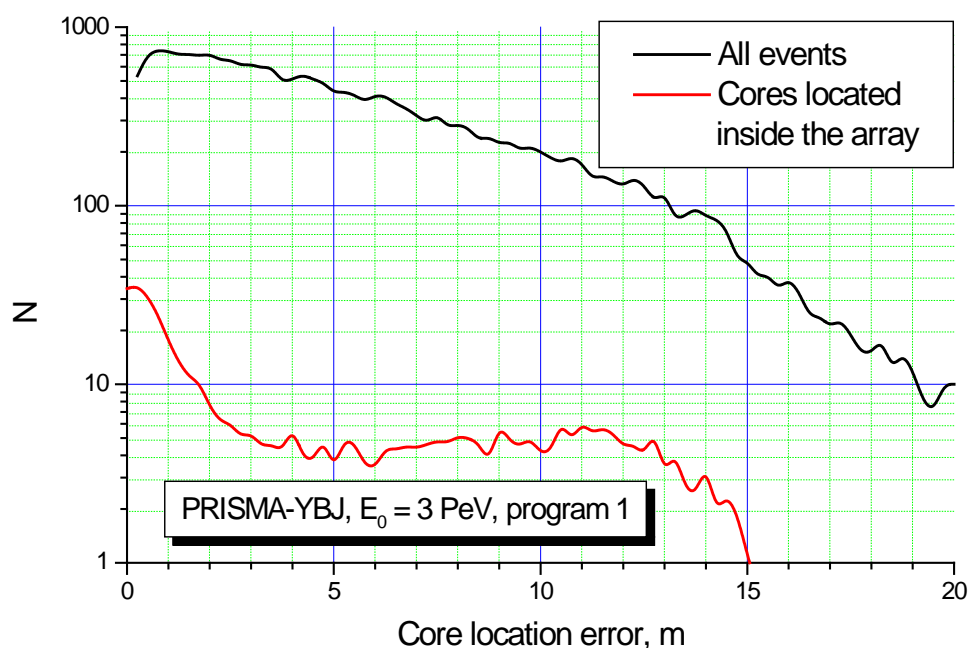


Рис. 50. Распределение событий по величине ошибки определения оси для установки PRISMA-YBJ, моделирование для протонов с энергией 3 ПэВ. Данные обрабатывались программой 1. Черным цветом – все события, красным – оси, которых определены программой внутри установки.

Данные обработаны программой 1. Видно, что при отборе событий внутри установки ошибка локации оси существенно уменьшается. Также видно, что неверная локация оси для установки из 4-х детекторов является серьезной проблемой.

На основе проведенного сравнения выбор касательно дальнейшей обработки данных прототипов PRISMA-YBJ и PRISMA-32 был сделан в пользу программы 1 (алгоритма на основе прямого двухступенчатого поиска).

#### 4.4.5. Функция пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ.

После обработки результатов моделирования были получены интересные нас в данной работе зависимости. На рис. 51 показана ФПР электромагнитной компоненты ШАЛ для высоты 4300 м, полученная в моделировании для первичных протонов и ядер железа. Также для сравнения приведены экспериментальные данные.

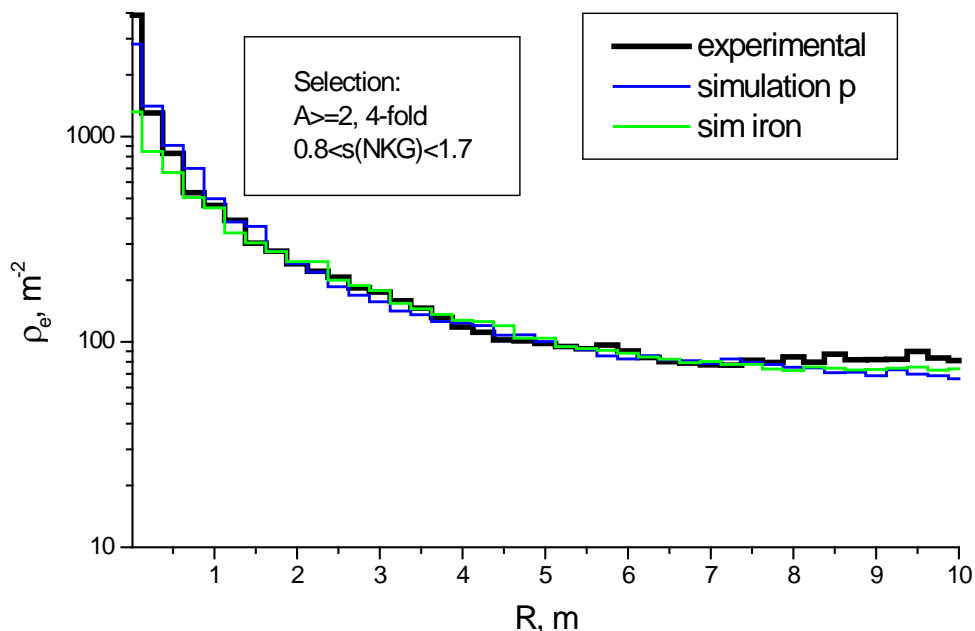
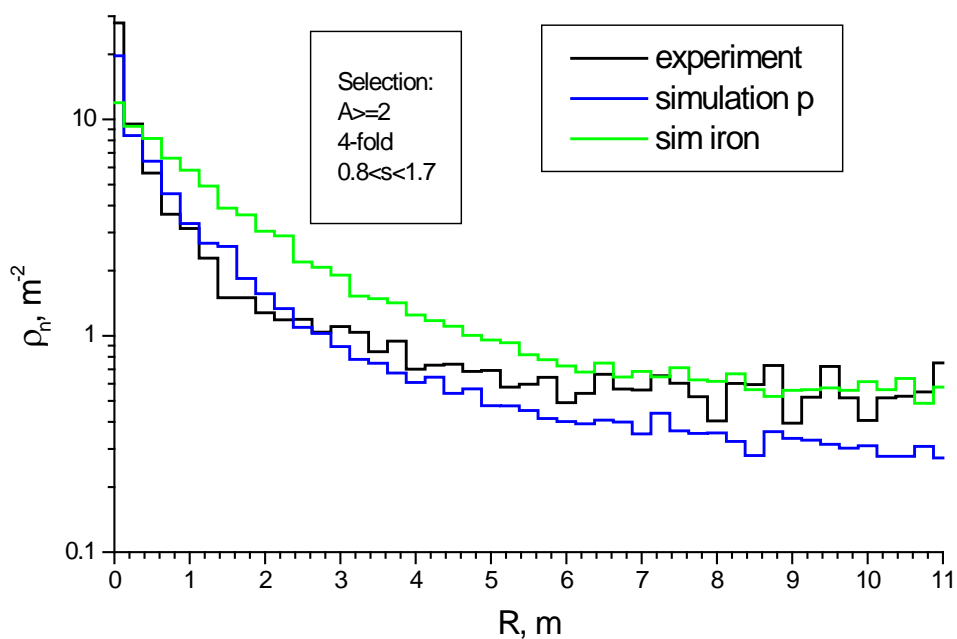


Рис. 51. ФПР электромагнитной компоненты ШАЛ для установки PRISMA-YBJ:

черная гистограмма – экспериментальные точки  
синяя гистограмма – моделирование для протонов  
зеленая гистограмма – моделирование для железа

На рис. 52 показана ФПР нейтронов, для той же высоты. На обоих рисунках видно хорошее согласие моделирования с экспериментом. Зависимости приведены без нормировки.





*Рис. 52. ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ для установки PRISMA-YBJ:  
 черная гистограмма – экспериментальные точки  
 синяя гистограмма – моделирование для протонов  
 зеленая гистограмма – моделирование для железа*

На рис. 54 и 55 показаны ФПР электромагнитной и нейтронной компонент ШАЛ для высоты 170 м над уровнем моря. Также как и на предыдущих рисунках видно хорошее согласие с экспериментом. Зависимости приведены без нормировки.

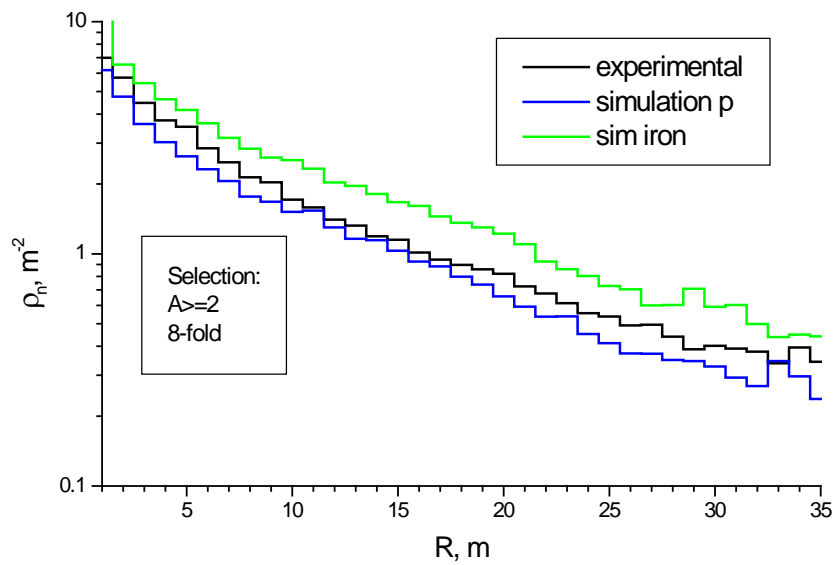


Рис. 53. ФПР тепловых нейтронов в ШАЛ для установки PRISMA-32:  
 черная гистограмма – экспериментальные точки  
 синяя гистограмма – моделирование для протонов  
 зеленая гистограмма – моделирование для железа

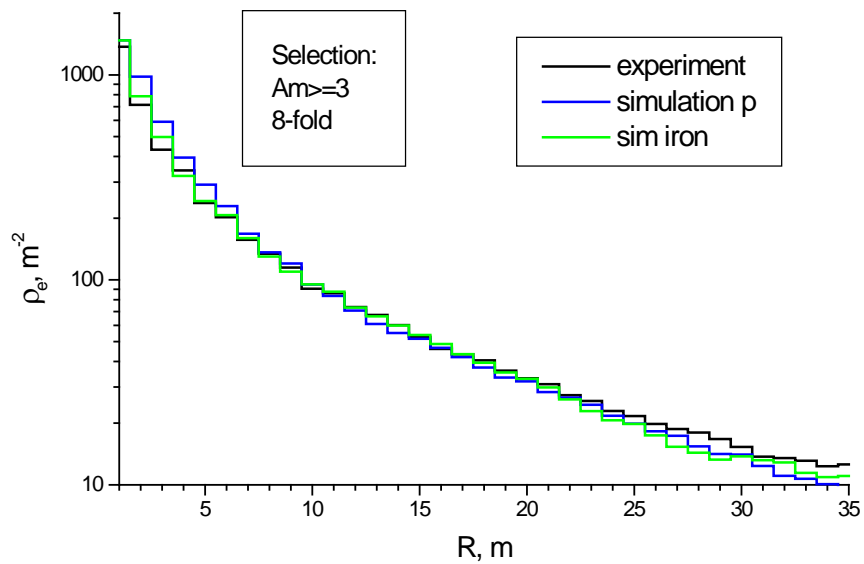


Рис. 54. ФПР электромагнитной компоненты ШАЛ для установки PRISMA-32:  
 черная гистограмма – экспериментальные точки  
 синяя гистограмма – моделирование для протонов  
 зеленая гистограмма – моделирование для железа

Полученная ФПР нейтронов в Москве заметно отличается от тибетской, однако эксперимент хорошо совпадает с результатами моделирования, проведенного описанным выше образом. Причина отличия функций пространственного распределения нейтронов в двух экспериментах объясняется разницей в толщине крыши, которая дает более широкое распределение нейтронов от адронов в Москве.

#### **4.4.6. Распределения ШАЛ по числу нейтронов.**

На рис. 55 и 56 показаны распределения ШАЛ по числу нейтронов для высоты 4300 м и 170 м по результатам моделирования для первичных протонов и ядер железа. Также как и на предыдущих рисунках видно хорошее согласие с экспериментом. Зависимости нормированы таким образом, чтобы распределения были разнесены по высоте и не сливались между собой.

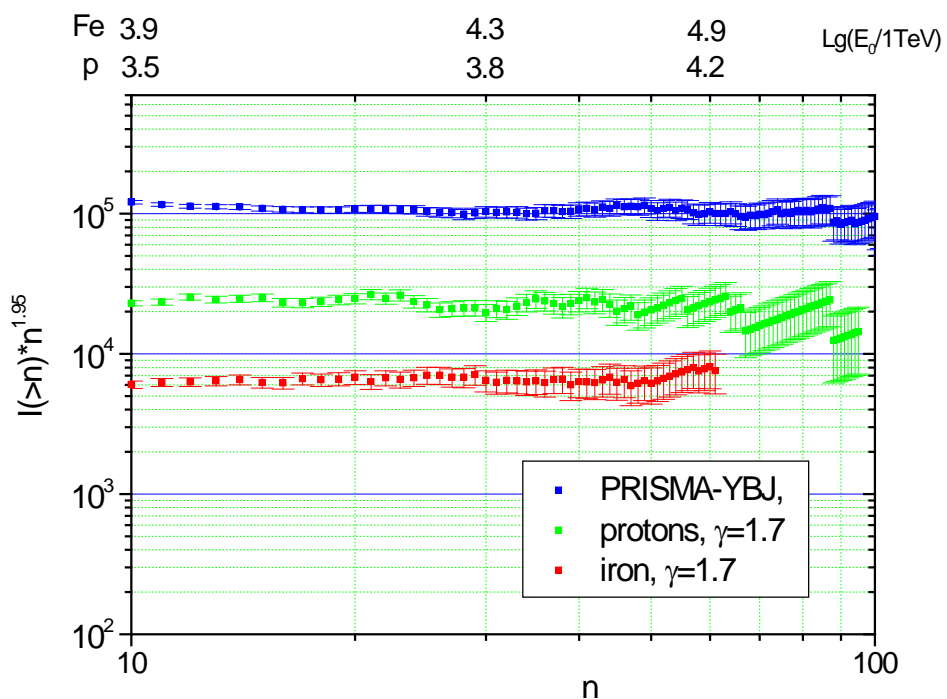


Рис. 55. Распределение ШАЛ по числу нейтронов по данным установки PRISMA-YBJ:

Синие точки – эксперимент

Зеленые точки – моделирование для протонов

Красные точки – моделирование для железа

Заданный в моделировании наклон первичного спектра  $\gamma=-1.7$  во всем диапазоне энергий.

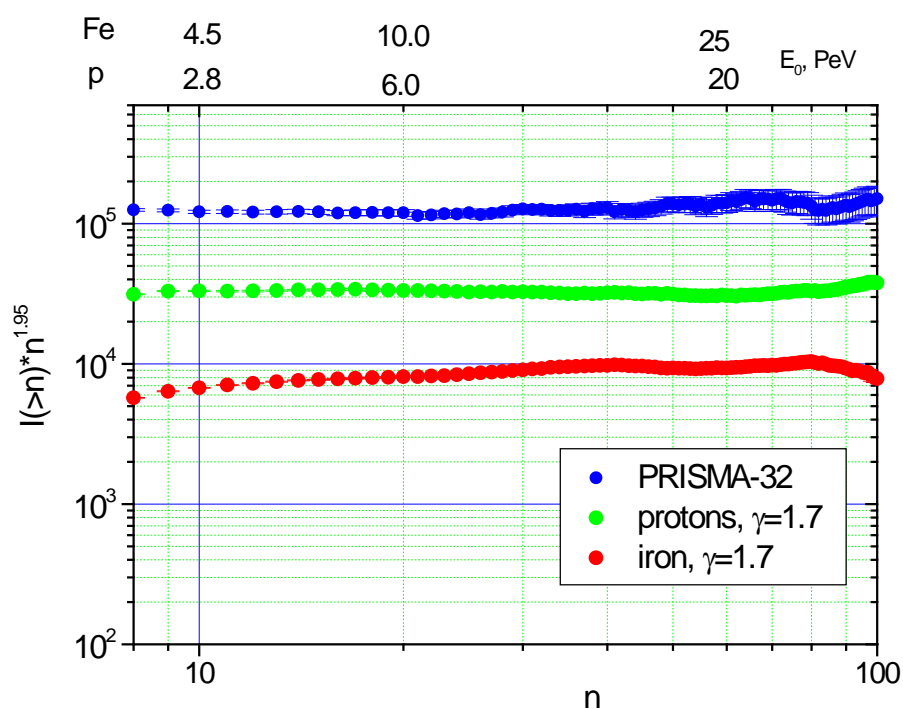


Рис. 56. Распределение ШАЛ по числу нейтронов по данным установки PRISMA-32:

*Синие точки – эксперимент*

*Зеленые точки – моделирование для протонов*

*Красные точки – моделирование для железа*

*Заданный наклон первичного спектра 1.7 на всем диапазоне. См. выше*

На всех рисунках видно хорошее согласие с экспериментом, хотя статистика ещё недостаточна велика и её набор продолжается.

## Глава 5. Исследования фона.

Для исследования нейтронной компоненты широких атмосферных ливней необходимо изучение и мониторинг в месте проведения эксперимента фона тепловых нейтронов и других фоновых импульсов в эн-детекторах.

Для выполнения этой задачи в МИФИ с 2010-го года постоянно в вариационном режиме работает установка «Нейтрон», состоящая из 4 эндетекторов, расположенных на различных этажах здания НОЦ НЕВОД. Один из детекторов расположен в подвале, один в стеклянном переходе между зданиями (данный детектор имеет наибольший темп счета фоновых нейтронов и наиболее чувствителен к его вариациям), ещё два детектора расположены на втором и третьем этажах. Данная установка подробно описана в работе [45, 61]. Также там проведен детальный анализ вариаций нейтронного фона, вызванных различными причинами.

На Тибете установка PRISMA-YBJ, параллельно с регистрацией ШАЛ работает также и в вариационном режиме. Эта система реализована следующим образом. У установки есть триггерный блок, который выдает сигнал либо на запись ШАЛ при совпадении срабатывания любых двух или более детекторов в течении 1 мкс, либо на счет отобранных по форме импульсов для каждого 16-го импульса при одиночном срабатывании. Далее он-лайн программа накапливает такие импульсы по каждому детектору за пять минут и производит запись в файл. Пересчет (запуск только от каждого 16-го импульса) позволяет минимизировать мертвое время установки за счет регистрации фоновых сигналов. В таком варианте селекция нейтронных импульсов по форме усложнена, поскольку при оцифровке сигнала от атмосферного ливня и последующих 20 мс используется интегрирование с постоянной времени 1 мкс, а для

детекторов, работающих только в вариационном режиме используется 5 мкс. Однако разделение все же возможно. В 2016-2017 годах планируется создание в Тибете двух отдельных вариационных установок из 2 эн-детекторов каждая.

Мониторинг фона тепловых нейтронов, который необходим для правильной интерпретации данных и проверки стабильности работы установок, дает помимо этого возможность исследовать геофизические процессы. Основанием для этого служит наличие в фоне нейтронов от распада радона, выход которого из грунта модулируется в том числе колебаниями Земли (собственными колебаниями, приливными волнами, вызываемыми гравитационным взаимодействием Земли с Луной и Солнцем). Для более полного решения этих задач была создана глобальная сеть эн-детекторов, о которой уже было рассказано в главе 2.

### ***5.1. Исследование сезонных вариаций фона тепловых нейтронов в Москве***

Исследование вариаций нейтронного фона на уровне моря проводилось на установке «Нейтрон» в НИЯУ МИФИ в НОЦ НЕВОД в непосредственной близости от установки PRISMA-32. Сезонная волна по данным детекторов 2-4 (детектор 1 находится под землей) показана на рис. 57. На графике хорошо видно падение темпа счета детекторов в период выпадения снега (в начале зимы) и их возвращение на прежний уровень

после таяния снега (в середине весны). Подробное исследование нейтронного фона в Москве приведено в работах [45, 61].

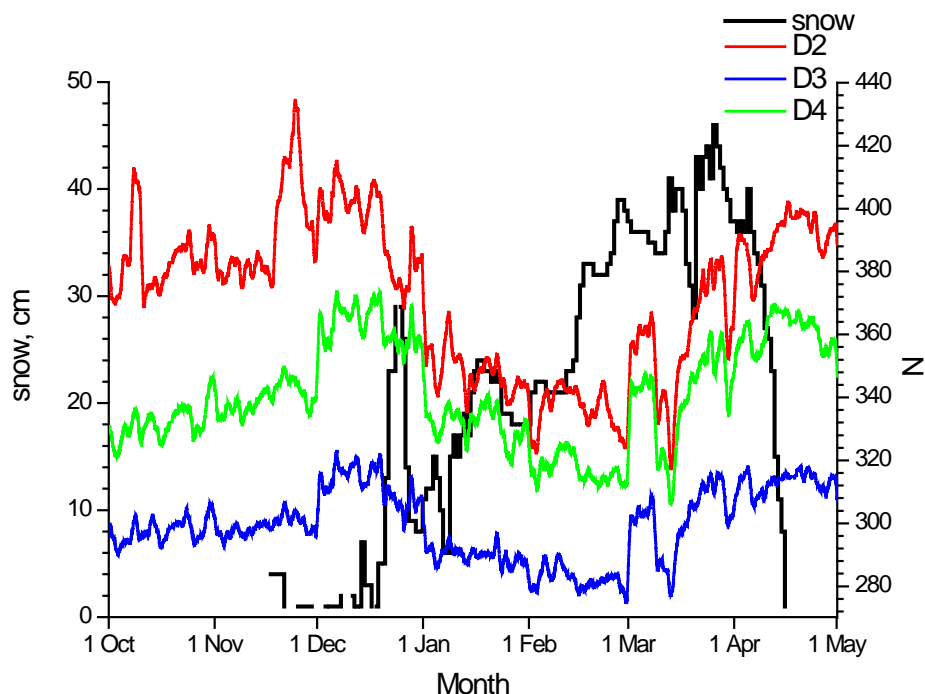


Рис. 57. Темпы счета детекторов 2-4 с поправкой на давление и изменение высоты снежного покрова зимой 2011-2012 (из работы [45]).

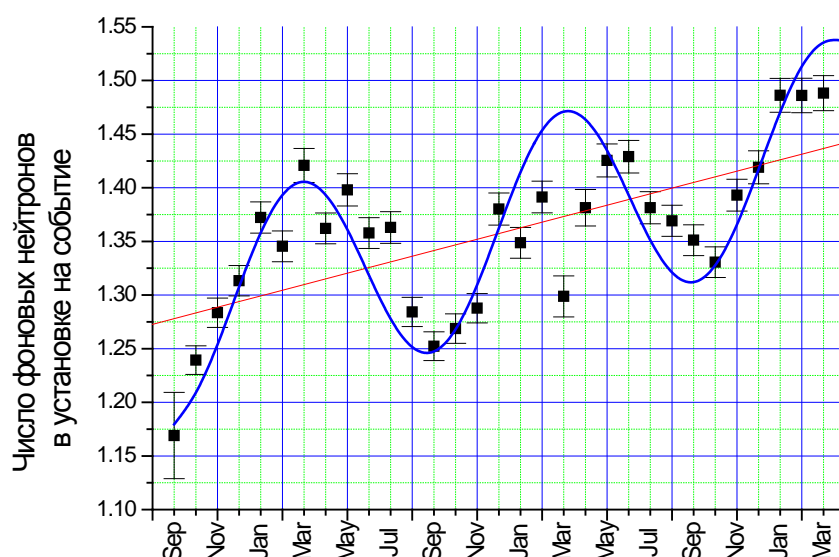
Темп счета детектора площадью  $0.36 \text{ м}^2$  на уровне моря составляет  $\sim 1$  имп/с. Следовательно, за время 20 мс после прихода ливня, в течение которых считаются нейтронные импульсы, среднее количество фоновых импульсов в детекторе составляет 0.02. В свою очередь, как видно из рис. 57, величина сезонного изменения темпа счета фоновых нейтронов составляет порядка 10-15%. Можно сделать вывод о том, что влияние сезонных вариаций на фон при регистрации ШАЛ мало по сравнению с величиной фона и не требует учета сезона при анализе данных. Тем не



менее, как упоминалось выше, мы постоянно контролируем фон случайных совпадений благодаря наличию программного триггера М0.

## **5.2. Исследование сезонных вариаций фона тепловых нейтронов на Тибете**

Кроме вариационного канала (измерения числа нейтроновых импульсов и импульсов от заряженных частиц за 5 мин с пересчетом на 16) фон на Тибете измеряется по так называемому нулевому мастеру. Раз в 5 минут происходит оцифровка 20 мс интервала и измеряется число случайных импульсов во всех детекторах. Далее это значение копится усредняется по месяцам. На рис. 58 показано изменение величины фона случайных импульсов в установке PRISMA-YBJ за почти три года её непрерывной работы с сентября 2013 года по март 2016 года.



*Рис. 58. Вариация среднемесячного числа фоновых нейтронов на один ливень за все время работы установки PRISMA-YBJ с 09.2013 по 03.2016.*

На рис. 58 хорошо видна сезонная вариация фона, а также имеется положительный тренд, связанный возможно с циклом солнечной активности. Среднее за время наблюдения значение фона на Тибете равняется  $\langle n_{\text{back}} \rangle = 1.35$  импульсов на ливень в установке.

На рис. 59 показано сезонное изменение фона тепловых нейтронов и коротких импульсов (часть из которых создана заряженными частицами, проходящими синхронно). Амплитуда годовой волны фона двух видов импульсов, так же как и на уровне моря, составляет порядка 10-15%. По этой причине мы так же делаем вывод о том, что изменение фона в течение года несущественное и не требуется учитывать его в анализе данных по регистрации атмосферных ливней. Что касается природы годовых вариаций фона, то они связаны с сезонами дождей на Тибете (снег там, как правило, отсутствует, и конец зимы является наиболее сухим периодом). Соответствующий график уровня осадков в течение года показан на рис. Кроме того, на рис. 59 представлена сезонная волна в данных радонометров, установленных в том же ангаре под полом итальянскими коллегами. Приведенные данные использованы в совместной статье, принятой к публикации в журнале Pure and Applied Geophysics.

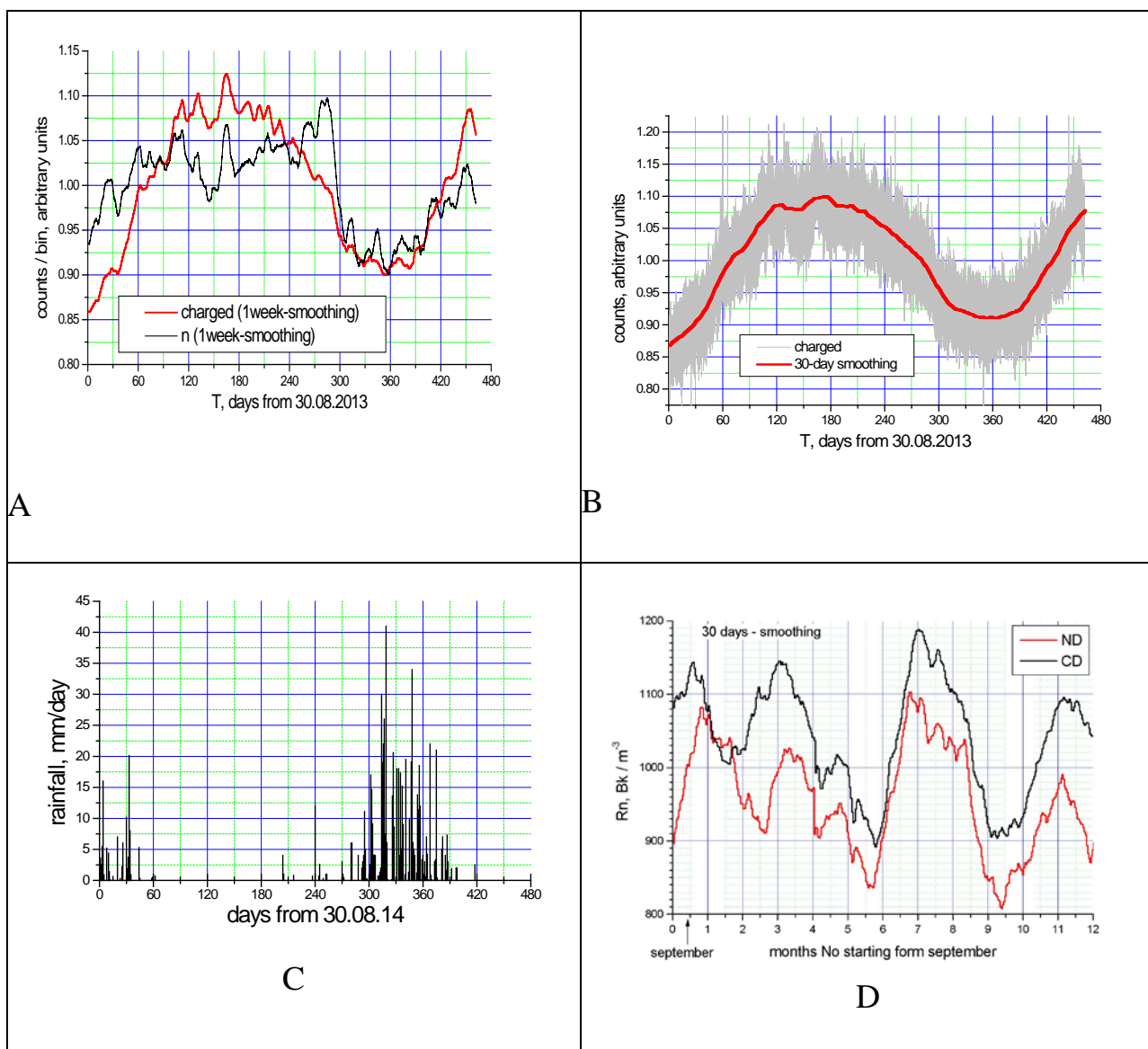
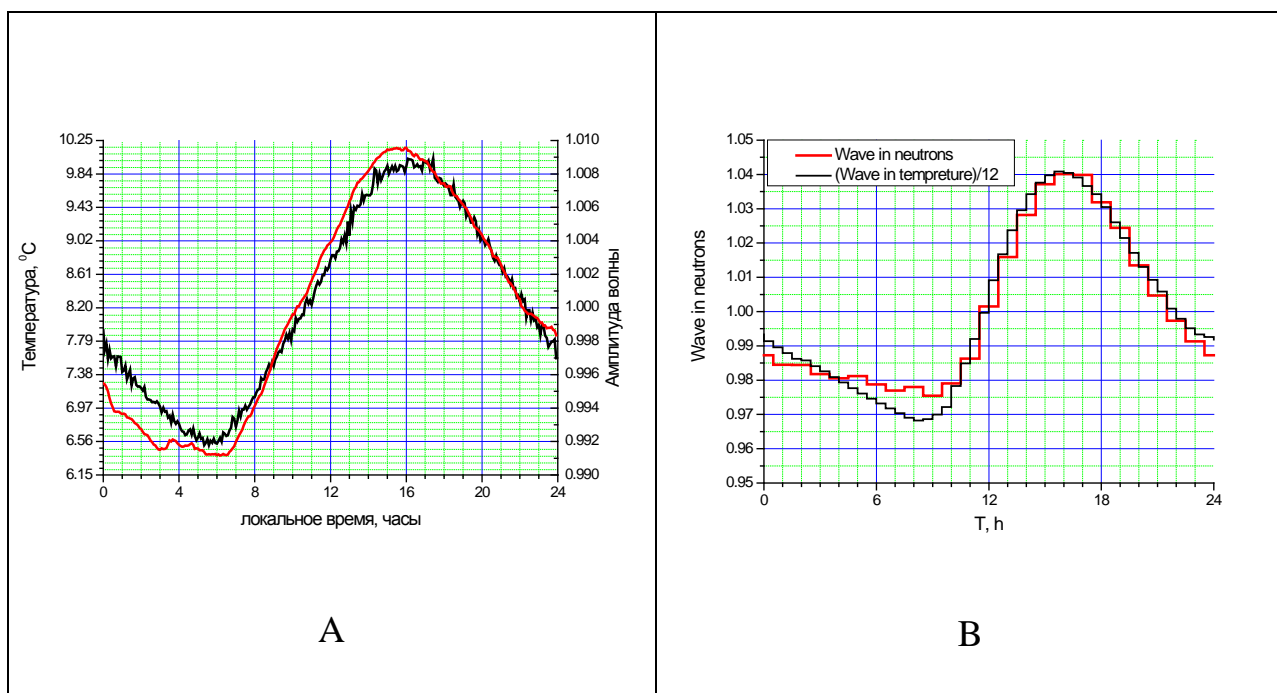


Рис. 59. Сезонные эффекты, связанные с различными факторами. А – темп счета нейтронов и «заряженных частиц» с недельным сглаживанием методом скользящего среднего; В – «заряженные частицы» с и без 1-месячного сглаживания; С – количество осадков (в виде дождя) в мм/день (взято из <http://rp5.ru>); D – концентрация радона в воздухе, измеренная при помощи радонметров (ячейки Лукаса) в двух различных точках в ангаре ARGO-YBJ (ND – north and CD – central detectors) с Сен. по Авг. и усредненное за два года.

### ***5.3. Другие вариации фона.***

#### **5.3.1. Суточные волны.**

Поскольку фоновый поток нейтронов находится в тепловом равновесии с окружающей средой, в вариациях фонового потока присутствует суточная волна обусловленная температурой. Ранее такая волна была обнаружена в данных установки «Нейтрон» в Москве [45, 61]. В данной работе суточная волна была построена по данным установки PRISMA-YBJ. Для наблюдения волны использовался метод наложения эпох, то есть суммирования точек соответствующих одному и тому же времени за каждые сутки и последующего усреднения (для данных установки PRISMA-YBJ усреднение составило 30 месяцев). На рис. 60 показаны суточные волны в величине потока тепловых нейтронов в Москве и в Тибете, а также приведены соответствующие волны в температуре.



*Рис. 60. Суточные волны в темпе счета тепловых нейтронов (черные) и температуре (красные) в Москве (по данным открытого детектора №2 из работы [45]) (А) и в Тибете (сумма всех детекторов) (В). Волны получены методом наложения эпох.*

Из рис. видно, что амплитуда суточной волны в Тибете больше чем в Москве (~3% против ~0.8%), что объясняется большим перепадом температур и резко-континентальным горным климатом.

### **5.3.2. Лунные волны.**

Воздействие Луны на Землю вызывает приливы в морях и океанах на нашей планете. Но приливные эффекты также проявляются в движениях земной поверхности, движениях грунта. Амплитуда приливных колебаний в грунте может достигать величин порядка 50 см [62]. Предположительно движения земной поверхности, особенно в горах, должны сказываться на выходе радона из грунта. А это в свою очередь может заметно сказываться на темпе счета тепловых нейтронов.

Для наблюдения вариаций фона тепловых нейтронов связанных движением Луны вокруг Земли был проведен анализ данных с установки PRISMA-YBJ методом наложения эпох. Метод наложения эпох представляет собой наложение друг на друга соответствующих точек одного и того же периода. То есть весь наблюдаемый временной ряд последовательно разбивается на одинаковые интервалы равные изучаемому периоду. В нашем случае этот период равен 29.53 дням и 7.38 дням. Далее число нейтронов зарегистрированных, например, за первый час первого дня одного периода складывается с числом нейтронов, зарегистрированным за первый час первого дня следующего периода. И так далее. В итоге мы получаем усредненную волну с заданным периодом. Полученные волны в темпе счета тепловых нейтронов и заряженных частиц (рожденных, в том числе, от естественной радиоактивности) показаны на рис. 61.

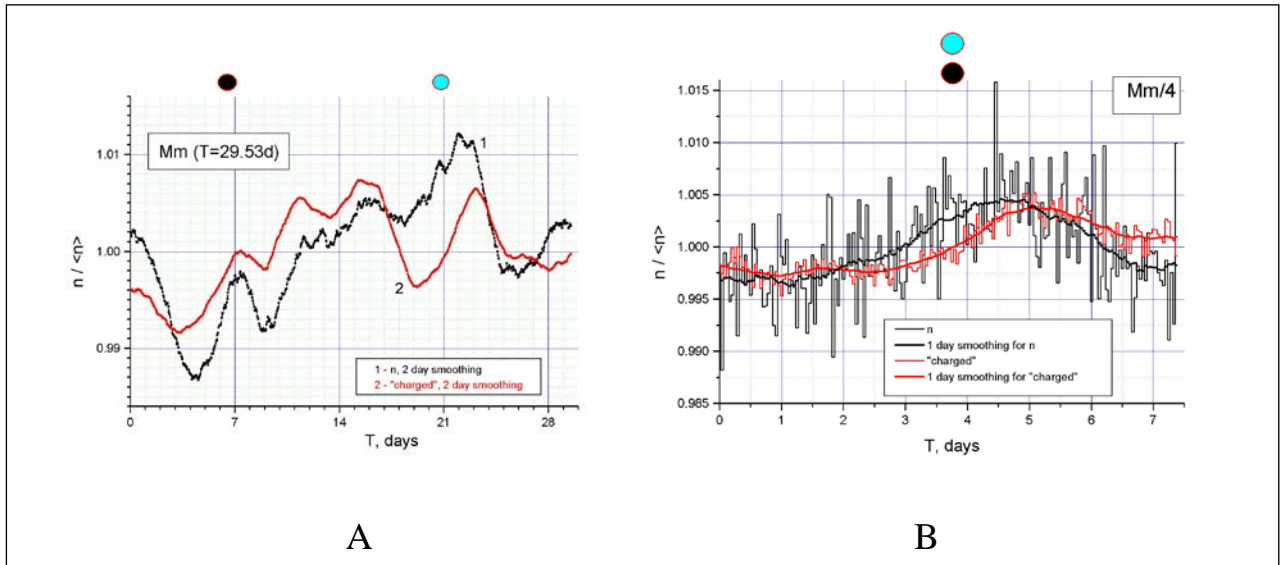


Рис. 61. Волны в темпе счета нейтронов и «заряженных частиц», полученные методом наложения эпох для синодического лунного месяца (А) и для одной четверти синодического лунного месяца (В). Черные круги: новолуние; светлые кружки: полнолуние.

На обоих графиках хорошо видны максимумы и минимумы. Амплитуды составляют порядка 1.5% для месячной волны и 0.5% для четверти месяца. На графике месячной волны хорошо видно, что максимум соответствует полнолуниям, а минимум, новолуниям. Усреднение проведено за 2 года работы установки с сентября 2013-го года по август 2015-го. Используемая методика анализа данных, а также полученные результаты опубликованы в работе [63].

### 5.3.2. Вариации фона нейтронов во время гроз.

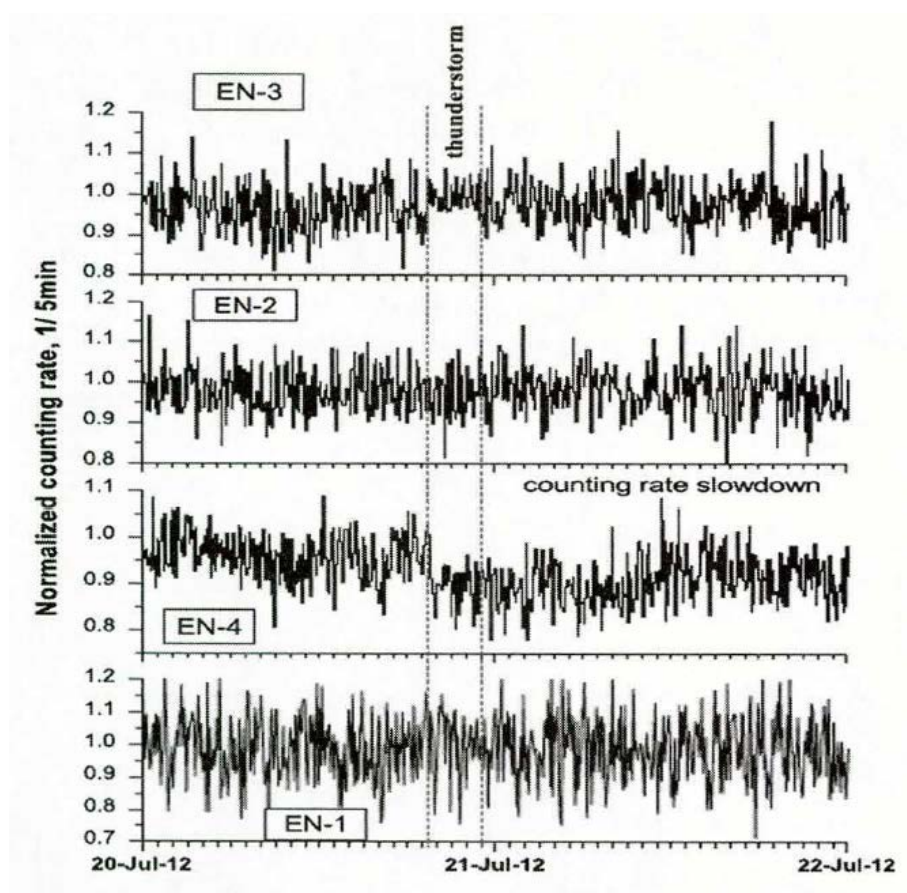
В последние годы в научной литературе обсуждался вопрос о величине изменения темпа счета нейтронных детекторов во время гроз. Среди публикаций на эту тему наиболее заметны были работы, выполненные на Арагаце [64], на Тянь-Шане[65], в Якутии [66], и на

Тибете [67], в которых утверждалось, что нейтронный фон во время грозы может возрастает от нескольких процентов [64, 67] до сотен процентов [65].

Эн-детекторы в течение уже длительного времени используются нами для наблюдения фона тепловых нейтронов. При этом они отличаются от привычных борных и гелиевых газовых счетчиков (на которых проводились измерения в цитированных выше статьях), как физическими свойствами детектора, так и системой регистрации с полной оцифровкой всех импульсов с отбором импульсов по форме. Поэтому мы также провели анализ данных темпа счета нейтронов во время гроз и не обнаружили статистически значимого увеличения темпа счета тепловых нейтронов на уровне 5.4% для 5-минутных данных и 12% для 1-минутных данных. Напротив, на наиболее открытых и, соответственно, чувствительных к погодным условиям детекторах мы обнаружили падение темпа счета на ~5-10% при сильных ливнях (только после достаточно длительного сухого периода), поскольку вода является, как известно, хорошим замедлителем и поглотителем нейтронов. Пример такого события показан на рис. 62. Подробности проведенного анализа описаны в работе [42, 68]. Из этой работы следует, что даже при таких природных явлениях, как мощный грозовой ливень, нейтронный фон изменяется не существенно и при этом в сторону уменьшения и только для детекторов,



расположенных вне здания и только если гроза сопровождается сильным ливнем после продолжительного сухого периода.



*Рис. 62. Темп счета 4-х детекторов установки Нейтрон в ЭК НЕВОД во время сильной грозы 20 июля 2012 года.*

## **Заключение**

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1) Проведено комплексное моделирование существующих прототипов установки PRISMA, расположенных в Москве и в Тибете. В моделировании использованы пакеты GEANT4.10 и CORSIKA6.9, широко применяемые сегодня для решения подобных задач. В ходе моделирования были получены: зависимость числа регистрируемых детектором нейтронов от энергии падающего адрона, функция пространственного распределения нейтронов относительно родительских адронов, функции пространственного распределения электромагнитной и нейтронной компонент ШАЛ в условиях проводимых экспериментов, хорошо аппроксимирующиеся двойными экспоненциальными функциями с параметрами, зависящими от толщины крыши над детекторами и практически не зависящими от высоты наблюдения над уровнем моря.

2) Впервые применен метод изучения адронной компоненты ШАЛ методом регистрации тепловых нейтронов путем создания двух небольших установок на разных высотах над уровнем моря. Проведена обработка и анализ данных установок PRISMA-YBJ и PRISMA-32, состоящих из эндетекторов.

3) Впервые с помощью эн-детекторов, расположенных на двух существенно различных высотах наблюдения измерены функции пространственного распределения электромагнитной компоненты ШАЛ и вторичных тепловых нейтронов, а также спектр ШАЛ по числу нейтронов в ПэВной области энергий, имеющий степенной вид с интегральным показателем  $-1.95 \pm 0.05$  для Тибета и  $-1.95 \pm 0.05$  для Москвы. Получено хорошее согласие экспериментальных данных с результатами расчетов, даже в абсолютных единицах, и с опубликованными в литературе экспериментальными данными для адронов ШАЛ. Показано, что ФПР нейтронов слабо зависит от высоты наблюдения, а разница объясняется, в основном, толщиной крыши над детекторами и геометрией экспериментов.

4) Проведен анализ данных по вариациям фона тепловых нейтронов в Тибете, получены амплитуды суточной температурной волны, сезонной волны, связанной с количеством осадков, а также обнаружена лунно-месячная волна и её 4-я гармоника. Показано, что сезонные, суточные и прочие вариации фона тепловых нейтронов, достаточно малы даже на Тибете (не более 10%) и не могут служить преградой для проведения там полномасштабного эксперимента PRISMA-LHAASO.

В заключение я выражаю глубокую благодарность моему научному руководителю - д.ф.-м.н. Стенькину Юрию Васильевичу за предоставленную тему диссертации, постоянный интерес к ней,

критические замечания и ценные советы, а также за неоценимый опыт научной работы, которым он щедро со мной делится.

Особую благодарность хочу выразить к.ф.-м.н. Громушкину Дмитрию Михайловичу за важный опыт экспериментальной работы, полученный при работе с установкой «Нейтрон» и создании установки PRISMA-32.

Большую благодарность хочу выразить к.ф.-м.н. Алексеенко Виктору Владимировичу за помощь в анализе вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов.

Также хочу отдельно поблагодарить к.т.н. Степанова Владимира Ивановича и Рулева Владимира Викторовича за работу по созданию электроники установок PRISMA-32 и PRISMA-YBJ.

Хочу выразить благодарность к.ф.-м.н. Шутенко Виктору Викторовичу и к.ф.-м.н. Дмитриевой Анне Николаевне за помощь в освоении программирования, которое очень пригодилось при выполнении данной работы.

Также хочу поблагодарить к.ф.-м.н. Лидванского Александра Сергеевича за рецензию и ценные замечания по данной работе.

Хочу поблагодарить весь коллектив Научно-образовательного центра НЕВОД за длительное и плодотворное сотрудничество.

Также хочу поблагодарить профессора Пекинского института физики высоких энергий доктора Ма Синьхуа (马欣华) и всех китайских коллег, участвующих в проектах PRISMA-YBJ и PRISMA-LHAASO.

## Список литературы

1. D. Skobelzyn, «Über eine neue Art sehr schneller  $\beta$ -Strahlen» Zs. Phys. 54, 686 (1929)
2. P. Auger et al. «Extensive cosmic-ray showers» // Rev. Mod. Phys. 11, 3-4, 288 (1939)
3. Н. Euler. «Über die Beobachtung von Luftschauern und Kernzertrümmerungen der kosmischen Strahlung in der Ionisationskammer» // Zs. Phys. 116, 73 (1940)
4. L. Landau, G. Rumer. «The cascade theory of electronic showers» // Proc. Roy. Soc. 166, 213 (1938)
5. Г.Т. Зацепин, ДАН СССР 67, 993 (1949)
6. С. Хаякава. «Физика космических лучей. Часть 1» // Изд-во Мир, Москва (1973)
7. Г.В. Куликов, Г.Б. Христиансен. «О спектре широких атмосферных ливней по числу частиц» // ЖЭТФ 35, 635 (1958)
8. С.И. Никольский. «Адронные взаимодействия в космических лучах при сверхускорительных энергиях» // Успехи физических наук 135, 12, 545-585 (1981)
9. N. Nesterova et al. «Hadron energy spectra of EAS generated by primary cosmic ray particles with the energies above  $10^{14}$  eV» // Proc.16th ICRC 8, 340 (1979)
10. J. Engler et al., «A warm-liquid calorimeter for cosmic-ray hadrons» // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 427, 3, 528-542 (1999)
11. V.G. Kozlov et al., «Neutrons in EAS with number of particles  $10^7$ - $10^8$ » // Proc. 16th ICRC 8, 356 (1979)
12. P.D. Acton et al., «The Hadron Component of 1014-1016 eV Extensive Air Showers» // Proc. 21st ICRC 9, 26-267 (1990)

13. Ю.В. Стенькин и др. «Метод подземного адронного калориметра для изучения свойств ШАЛ» // Известия РАН, серия физическая, 75, 3, 400-402 (2011)
14. M. Müller et al. «A measurement of the energy spectra of unaccompanied hadrons» // Proc. 28<sup>th</sup> ICRC 1, 101, (2003)
15. T. Antoni et al. «The primary proton spectrum of cosmic rays measured with single hadrons at ground level» // Astrophys. J., 612, 2, 914, (2004)
16. R. Glasstetter et al., «Electron, muon and hadron size spectra of EAS in the “knee” region» // Nucl. Phys. B - Proc. Suppl. 75, 1, 238-240 (1999).
17. J.R. Hörandel et al. «A measurement of the primary cosmic-ray energy spectrum using the hadronic air shower component» // Proc. 27<sup>th</sup> ICRC 1, 137, (2001)
18. A. Chiavassa et al. «Latest results from the KASCADE-Grande experiment» // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 742, 10-15, (2014)
19. V.V. Prosin et al. «Tunka-133: Results of 3 year operation» // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 756, 94-101, (2014).
20. Budnev N. M. et al. «The promise of the Tunka-Grande scintillation experiment for studying the mass composition of primary cosmic rays» // Mosc. Univ. Phys. Bull., 70, 2, 160-165, (2015)
21. Aartsen M. G. et al. «Measurement of the cosmic ray energy spectrum with IceTop-73» // Phys. Rev. D, 88, 4, 042004, (2013)
22. S. Knurenko, I. Petrov, «Mass composition of cosmic rays at ultra high energies by Yakutsk data» // J. Phys.: Conf. Ser., 632, 1, 012098, (2015)
23. Yu.V. Stenkin and J.F. Valdés-Galicia «Neutron bursts in EAS: New physics or nuclear physics?» // Proc. 27<sup>th</sup> ICRC, 1, 1453, (2001)
24. V.T. Cocconi. «On the Origin of the Neutrons Associated with the Extensive Cosmic-Ray Showers» // Phys. Rev., 74, 2, 226, (1948)

25. V.A. Antonova et al. «Phenomenon of the anomalous delay of hadronic and electronic components of EAS»// Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 75, 1, 333-335, (1999)
26. Yu.V. Stenkin. «On the PRISMA project»// Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 196, 293-296, (2009)
27. Yu.V. Stenkin. «Thermal neutrons in EAS: a new dimension in EAS study»// Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 175–176, 326–329, (2008)
28. D.D. Djappuev et al. «Compact multicomponent array for EAS study (MULTICOM)» // Proc. 27th ICRC, 1, 822, (2001)
29. Д.М. Громушкин и др. «Установка нового типа для регистрации ШАЛ: первые результаты» // Известия РАН, серия Физическая 77, 5, 704-706 (2013)
30. <http://ununevod.mephi.ru/ru/>
31. <http://www.neutrino.inr.ru/meet12/sten'kin.pdf>
32. P Bernardini (for the ARGO-YBJ Collaboration) «The ARGO-YBJ experiment in Tibet» // J. Phys.: Conf. Ser., 120, 6, 062022
33. M. Amelchakov et al. «Large scintillator en-detector with natural boron for EAS study» // PoS(ICRC2015) 651
34. Z. Cao et al. «Status of LHAASO updates from ARGO-YBJ»// Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 742, 95-98, (2014)
35. Yu.V. Stenkin. «Large scintillator detector for thermal neutron recording»// Nuclear Track Detectors: Design, Methods and Applications, 10, 253-256 (2010).
36. M. Katagiri et al. «High-position-resolution neutron imaging detector with crossed wavelength shifting fiber read-out using two ZnS/6 LiF scintillator sheets»// Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 573, 1, 149-152, (2007)
37. T. Nakamura et al. «Development of a ZnS/<sup>10</sup>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> scintillator with low-afterglow phosphor»// J. Phys.: Conf. Ser., 528, 012043, (2014)



38. <http://ssmr.ucd.ie/ansri2015/talks/Wednesday/mcmillan.pdf>
39. Д.М. Громушкин и др. «Новый метод регистрации адронной компоненты ШАЛ» // Ядерная физика 78, 379-382 (2015)
40. V. Alekseenko et al. «Registration of Forbush decrease 2012/03/08 with a global net of the thermal neutron scintillation en-detectors»// J. Phys.: Conf. Ser., 409, 1, 012190, (2013)
41. J.A. Simpson. «The cosmic ray nucleonic component: The invention and scientific uses of the neutron monitor»// Space Science Reviews, 93, (1/2), 11–32, (2000)
42. В.В. Алексеенко и др. «Вариации нейтронного потока во время гроз»// Известия РАН, серия Физическая, 79, 5, 739–741, (2015)
43. Yu.V. Stenkin et al. «Seasonal thermal neutron flux variations at high altitude» // Proc. 34th ICRC, PoS(ICRC2015) 343 (2015)
44. D. Gromushkin et al. «The array for EAS neutron component detection» // J. Instr. 9, 08028, (2014)
45. Д.М. Громушкин «Установка для регистрации нейтронной компоненты ШАЛ» // Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., МИФИ, Москва, (2014)
46. Yu. Stenkin. «On the PRISMA project» // ArXiv: 0902.0138v1 [Astroph.IM]
47. Ю.В. Стенькин «Исследование нейтронной компоненты широких атмосферных ливней как новый метод изучения космических лучей сверхвысоких энергий» // Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н., ИЯИ РАН, Москва, (2010).
48. Yu.V. Stenkin et al. «The ProtoPRISMA array for EAS study» // Proc. 32<sup>nd</sup> ICRC 03, 1136 (2011)
49. G. Aielli et al. «Layout and performance of RPCs used in the ARGO-YBJ experiment» // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, 562, 92-96, (2006)

50. B. Bartoli et al. «Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in Extensive Air Showers selected by the ARGO-YBJ experiment» // *Astropart. Phys.* 81, 49-60 (2016)
51. Yu.A. Fomin et al. «Dependence of EAS size spectrum on a form of charged particle lateral distribution function» // *Proc. 29th ICRC*, 6, 353-356, (2006)
52. T. Antoni et al. «Electron, muon, and hadron lateral distributions measured in air showers by the KASCADE experiment» // *Astropart. Phys.*, 14, 245-260, (2001)
53. P. Bernardini et al. «Study of the shower front structure at few meters from the core with ARGO-YBJ» //, *Proc. 33<sup>rd</sup> ICRC*, 0781 (2013)
54. Yu.V. Stenkin et al. «EAS thermal neutron lateral and temporal distributions» // *arXiv:1512.02042v1 [astro-ph.IM]*
55. A.A. Petrukhin et al. «EAS spectrum in thermal neutrons measured with PRISMA-32» // *Proc. 34th ICRC, PoS(ICRC2015) 427* (2015)
56. <https://www.ikp.kit.edu/corsika/>
57. S. Ostapchenko. «QGSJET-II: physics, recent improvements, and results for air showers»// *EPJ Web of Conferences* 52, 02001, (2013)
58. D. Heck. «Low Energy Hadronic Interaction Models»// *ArXiv:astro-ph/0410735v1*, (2004)
59. В.С. Барашенков, В.Д. Тонеев. «Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами», Атомиздат, 178, (1972)
60. C. Hatton. «The Neutron Monitor»// *Progress in Elementary Particle and Cosmic Rays Physics*, vol. X, North-Holland, Amsterdam, 41, (1971)
61. О.Б. Щеголев «Изучение вариаций фоновых потоков тепловых нейтронов по данным установки «Нейтрон» // *Дипломная работа*, МИФИ, Москва, (2013)
62. П. Мельхиор. «Земные приливы»// *Изд. Мир*, Москва, 28, (1956)

63. Yu.V. Stenkin et al.. «Seasonal and Lunar month periods observed in natural neutron flux and radon concentration at high altitude» // ArXiv:1605.05406 [physics.geo-ph]
64. A. Chilingarian, N. Bostanjyan, and L. Vanyan. «Neutron bursts associated with thunderstorms»// Phys. Rev. D 85, 085017 (2012)
65. A.V. Gurevich et al. «Strong flux of low-energy neutrons produced by thunderstorms»// Phys. Rev. Lett., 108, 125001, (2012)
66. V.I. Kozlov, V.A. Mullayarov, S.A. Starodubtsev, and A.A. Toropov. «Neutron bursts associated with lightning cloud-to-ground discharges»// J. Phys.: Conf. Ser., 409, 012210, (2013)
67. H. Tsuchiya. «Surrounding material effect on measurement of thunderstorm-related neutrons»// Astropart. Phys., 57–58, 33, 12, (2014)
68. V.V. Alekseenko et al. «Decrease of atmospheric neutron counts observed during thunderstorms»// Phys. Rev. Lett., 114, 12, 125003, (2015)