

## Введение

### Космические лучи. Их происхождение

Космические лучи были открыты в 1912 г. В. Гессом. Различают первичные космические лучи – космические лучи до входа в атмосферу и вторичные космические лучи, образовавшиеся в результате процессов взаимодействия космических лучей с атмосферой Земли.

На Рис.1, представлены основные компоненты первичных космических лучей.

Характеристики космических лучей до входа в атмосферу (первичные космические лучи)		
	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\sim 1 \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \times \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Ядерная компонента - <math>\sim 90\%</math> протонов, <math>\sim 10\%</math> ядер гелия, <math>\sim 1\%</math> более тяжелых ядер</li><li>2. Электроны (<math>\sim 1\%</math> от числа ядер)</li><li>3. Позитроны (<math>\sim 10\%</math> от числа электронов)</li><li>4. Антиадроны</li></ol>	P – 35%, He – 25% O – 15% Si – 15% Fe – 10%
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ

Проблема происхождения космических лучей возникла сразу же после их открытия. Все теоретические предсказания о механизме их возникновения и ускорения останутся искусственными, пока не будет достоверных данных о химическом составе и их экспериментальных спектрах за пределами атмосферы.

По современным представлениям основная часть первичного космического излучения (ПКИ) возникает вне солнечной системы. Исключения составляют лишь частицы небольших энергии ( $E_0 < 10$  ГэВ), которые частично генерируются на Солнце в момент больших вспышек; а также частицы малых энергий, заполняющие геомагнитную ловушку.

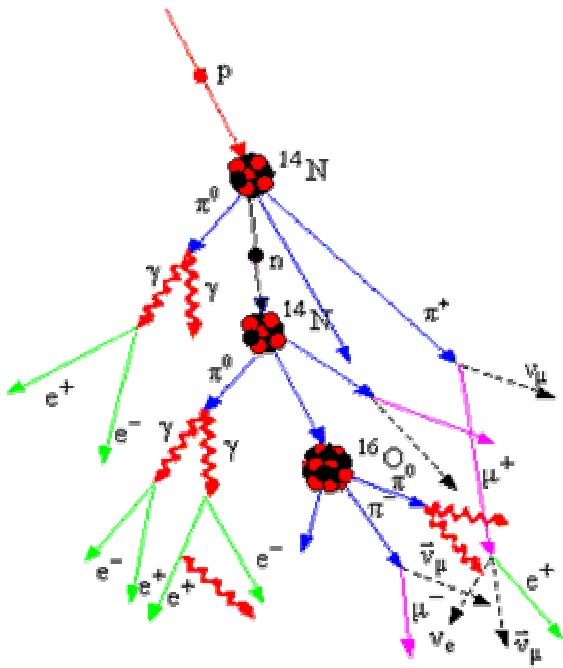


Рис.1

среднюю мощность  $P$  сверхновых в нашей Галактике :

$$P = \frac{W}{T} \approx 10^{40} \text{ эрг/сек.}$$

Где  $1/T$  - частота появления сверхновых . Отсюда следует , что мощности сверхновых достаточны для поддержания постоянной интенсивности космических лучей в Галактике . Основными источниками первичных космических лучей являются взрывы сверхновых звезд ( галактические космические лучи ) и Солнце .

Космические лучи представляют собой поток ядер атомов , большей частью протонов , зародившихся и ускоренных до высоких энергий в космических объектах или в космическом пространстве . Изучение космических лучей сверхвысоких энергий интересно как с точки зрения астрофизики , так и физики ядра и элементарных частиц . Дело в том что , с одной стороны , источниками этого излучения могут быть такие астрофизические объекты , как оболочки сверхновых звезд , пульсары , звезды Вольфа-Райе , черные дыры , активные ядра галактик и квазары , и поэтому получаемая информация очень важна для изучения этих объектов и процессов ускорения частиц в них . С другой стороны , рассматриваемое излучение состоит из очень больших энергий , в тысячи раз превосходящих те , которые достигнуты на ускорителях . Поэтому исследования космических лучей сверхвысоких энергий имеет важное значение для изучения свойств элементарных частиц и их взаимодействий .

Некоторые экспериментальные проблемы были решены после запусков первых искусственных спутников .

Мощность ПКИ  $\approx 10^{40}$  эрг/сек позволяет отвергнуть предположение , что источником космических лучей могут служить звезды типа Солнца . В галактике имеется  $10^{11}$  звезд типа Солнца , и , следовательно , их суммарная мощность (  $10^{34}$  эрг/сек ) на много порядков меньше требуемой .

Как было показано В.Л.Гинзбургом , такую энергию можно найти в грандиозных явлениях - взрывах << сверхновых звезд >> . << Сверхновые звезды >> - это огромные (  $\approx 5 \times 10^{18}$  см ) расширяющиеся газовые туманности , возникающие в результате взрыва звезд .

Сверхновые звезды в нашей Галактике вспыхивают в среднем два раза в столетие . Тогда легко найти

Большинство явлений, которые исследуют в космических лучах, разыгрываются в атмосфере. Атмосфера состоит в основном из азота и кислорода. Обычно, кроме специальных случаев, принимают только эти два газа. Их атомные номера  $Z = 7$  (78,1%) и  $Z = 8$  (21%).

Плотность воздуха у земли имеет величину  $0,00123 \text{ г/см}^3$ . Общее количество вещества в вертикальном столбе воздуха от земли до границы атмосферы  $1030 \text{ г/см}^3$ . Толщина атмосферы ничтожно мала по сравнению с радиусом Земли поэтому почти всегда атмосферу можно считать плоской.

Атмосферное давление меняется с высотой. В «стандартной» атмосфере, отличающейся посточным градиентом температуры в тропосфере и постоянством температуры в стратосфере, давление изменяется по барометрической формуле.

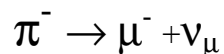
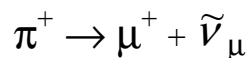
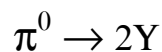
Впервые ливни из атмосферы наблюдал Д.В. Скобельцин в 1927-1929 гг. Тогда было установлено, что космическое излучение представляет собой поток частиц очень высокой энергии. Возникла важнейшая задача изучения их свойств, процессов взаимодействия с веществом и с атомными ядрами.

Широкий Атмосферный Ливень (ШАЛ) зарождается в атмосфере, процессом взаимодействия первичного космического луча с ядрами атомов атмосферы.

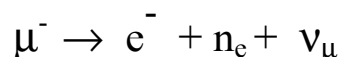
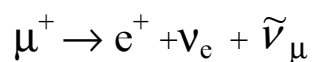
В результате взаимодействия с ядрами атмосферы первичные космические лучи (в основном протоны) создают большое число вторичных частиц - пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов. Таким образом вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию.

В одном акте взаимодействий протон обычно теряет ~50% своей энергии, а в результате взаимодействий возникают в основном пионы. Каждое последующее взаимодействие первичной частицы добавляет в каскад новые адроны, которые летят преимущественно по направлению первичной частицы, образуя адронный кор ливня.

Образующиеся пионы могут взаимодействовать с ядрами атмосферы, и могут распадаться, формируя мюонную и электронную компоненты ливня. Адронная компонента до поверхности Земли практически не доходит, превращаясь в мюоны, нейтрино и  $\gamma$  кванты.



Мюоны в свою очередь могут распадаться



Образующиеся при распаде нейтральных пионов  $\Upsilon$  – кванты вызывают каскад электронов и  $\Upsilon$  – квантов, которые в свою очередь образуют электрон – позитронные пары.

Заряженные лептоны теряют энергию на ионизацию и радиационное торможение. Поверхности земли в основном достигают релятивистские мюоны. Электронно – фотонная компонента поглощается сильнее.

Схематически ядерно – каскадный процесс представлен на Рис.2

Один протон с энергией  $> 10^{14}$  эВ может создать  $10^6 - 10^9$  вторичных частиц. На поверхности Земли адроны ливня концентрируются в области порядка нескольких метров, электронно – фотонная компонента - в области  $\sim 100$  м, мюонная - нескольких сотен метров.

На Рис.2 представлено пространственное распределение компонент широкого атмосферного ливня. Исследования

космических лучей на установке ШАЛ МГУ в 50-60-ые годы привело к ряду важных научных результатов. Впервые были изучены функции пространственного распределения ливневых частиц различной природы (электронов, мюонов, адронов) и их энергетические характеристики, доказана определяющая роль флуктуаций в развитии ШАЛ. Наиболее ярким результатом стало открытие излома в энергетическом спектре первичного космического излучения при энергиях около  $3 \times 10^{15}$  эВ на основе данных о дифференциальном спектре ШАЛ по числу частиц.

Обнаружение излома в спектре по числу электронов ШАЛ, а затем и в спектре по числу мюонов привело к стимулированию исследований в этом направлении во многих ведущих лабораториях мира (в США, Японии, Англии, Франции, ФРГ). В настоящее время существование излома в спектре первичного космического излучения при энергии  $3 \times 10^{15}$  эВ подтверждено исследованиям в нескольких лабораторий мира.

Большие энергии (до  $10^{16}$  эВ) галактических космических лучей объясняются ускорением частиц на ударных волнах, образующихся взрывах сверхновых. Природа космических лучей сверхвысоких энергий пока не имеет однозначной интерпретации. На Рис.3 показан спектр всех частиц первичных галактических лучей.

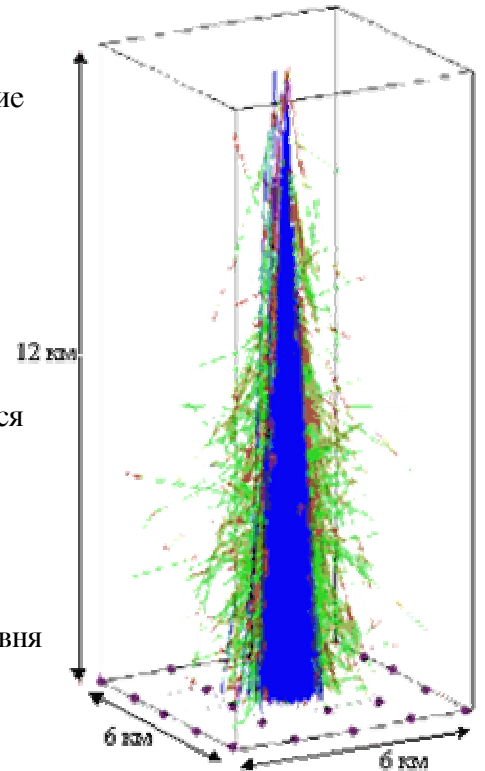


Рис.2

В широком диапазоне энергий спектр аппроксимируется соотношением  $dN/dE \sim E^{-2.7}$ . Особый интерес представляют области энергий  $10^{15} - 10^{16}$  эВ так называемые “колени” (knee) и  $10^{18} - 10^{19}$  - “лодыжка” (ankle), в которых наблюдаются аномалии.

Интенсивность космических лучей на больших интервалах времени была постоянна в течении  $\sim 10^{19}$  лет.

Однако, появились данные, что 30 - 40 тыс. лет тому назад интенсивность космических лучей заметно отличалась от современной (см Рис.4). Пик интенсивности связывают со взрывом близкой к Солнечной системе ( $\sim 50$  пк) Сверхновой.

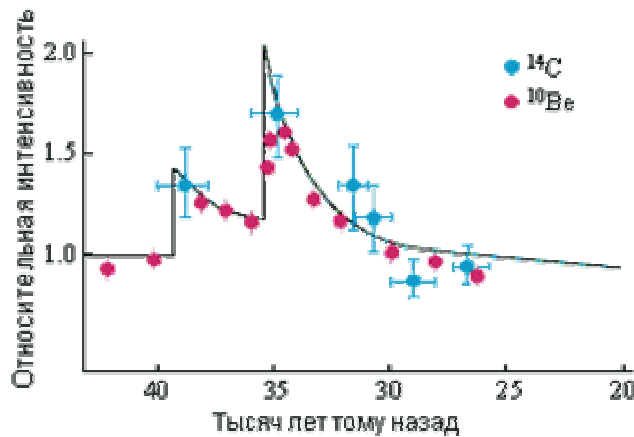
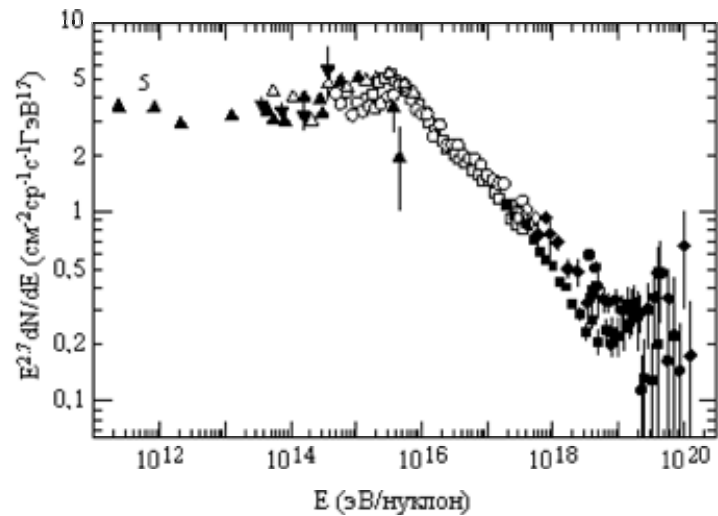


Рис.4

Зависимость интенсивности космических лучей от времени, получения при исследовании относительной концентрации космогенных радиоактивных изотопов  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ .

### Исследования космических лучей в области энергий $10^{15} - 10^{17}$ эВ методом ШАЛ на горе Арагац

В конце XX на горе Арагац для исследования космических лучей с энергией  $10^{15} - 10^{17}$  эВ был спроектирована установка АНИ.

К сожалению, полностью проект АНИ задействован не был, однако на его базе сейчас действуют две установки Макет – Ани.

Гамма для регистрации ШАЛ с числом частиц  $N_e \geq 10^5$ , что соответствует первичным энергиям  $E_0 \sim 10^{14}$  эВ. Установка расположена на горе Арагац, на высоте 3200 м над уровнем моря ( $\sim 700$  г/см<sup>2</sup> вещества атмосферы) и состоит из 92 сцинтилляционных детекторов для регистрации ШАЛ.

24 детектора имеют площадь регистрации  $0.09$  м<sup>2</sup>, а остальные 68 – с площадью  $1$  м<sup>2</sup>.

Детекторы расположены на площади  $\sim 75 \times 40$  м<sup>2</sup>. Две группы детекторов находятся на расстоянии  $\sim 100$  м (15 детекторов) и  $65$  м (4 детектора) составляют периферийные пункты регистрации.

Наряду с детекторами, регистрирующими плотности ливневых частиц, установка оборудована системой (fast-timing техника) для определения угловых координат не хуже чем  $1.6^\circ$  по зенитному углу и  $6^\circ$  по азимутальному.

Система счета информации выполнена в стандарте САМАС, и подключена с IBM p/c 486.

В настоящей работе изложены результаты расчетов эффективности, точности экспериментальной установки Макет – Ани.

Актуальной задачей для всех установок исследующих физику ШАЛ является проблемой идентификации ливня от энергии и атомного номера первичного ядра, генерировавшего ливень. Для решения этой задачи, обычно, используется метод математического моделирования ядерно – каскадного процессов в атмосфере. При этом, исследователям известно, как энергия  $E_0$  так и атомный номер первичного ядра, а так же параметры ливня на уровне наблюдения ( $N_e, S, X_0, Y_0, \theta, \phi$  и т.д).

Для достаточно корректного сравнения моделированных данных прохождения первичного космического излучения (ПКИ) при энергиях  $E_0 \approx 10^{15}$  эВ, инициирующих широкие атмосферные ливни (ШАЛ), через атмосферу с экспериментальными измерениями параметров ШАЛ на уровне их наблюдения, необходимо также промоделировать как условия наблюдения (регистрации), так и процедуру восстановления параметров того или иного класса событий. Иными словами, необходимо учитывать функцию отклика установки, посредством которого проводятся экспериментальные исследования.

## Моделирования отклика установки Макет-Ани

### а) Моделирования параметров ШАЛ

Для вычисления эффективности триггера установки и оценки точности реконструкции ШАЛ был разработан алгоритм Монте-Карло моделирования псевдоэкспериментальных событий.

В моделировании учитываются флуктуации физических параметров ШАЛ, а так же экспериментально оцененные точности системы регистрации. Входными параметрами являются – мощность ливня -  $Ne$ , параметр возраста -  $S$ , положение оси ( $X_0, Y_0$ ) и угловые координаты - зенитный угол  $\theta$  и азимутальный-  $\phi$ .  $Ne$  моделируется по степенной функции с показателем  $Y=2,5$  и пороговым значением  $Ne^0 = 3 \times 10^4$  :

$$F(Ne) = \frac{(Y-1)}{Ne^0} \left( \frac{Ne}{Ne^0} \right)^Y \quad (1)$$

Положение оси ШАЛ – ( $X_0, Y_0$ ) моделируются равномерно в прямоугольнике  $120 \times 60 \text{ м}^2$ . Угловые координаты моделируются : - азимутальный угол  $\phi$  моделируются равномерно от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  ; зенитный угол дается следующем виде  $\text{Cos}^p \theta$  в интервале  $0^\circ$  до  $60^\circ$ , где  $p = 5,6 = 700 \text{ г/см}^2 / \Lambda$ , где  $\Lambda = 140 \text{ г/см}^2$  и является пробег поглощения ливней .

Параметр возраста  $S$  моделируется по Гауссовской функции со средним  $\langle S(Ne, \theta) \rangle$  и дисперсией  $\sigma_s = 15\%$  от  $\langle S(Ne, \theta) \rangle$ . Зависимость  $S$  от  $Ne$  и  $\theta$  максимально приближена к экспериментально наблюдаемой форме:

$$\langle S(Ne, \theta) \rangle = 1,0611 \text{Sec}^{0,25} \theta - 0,11 \text{Lg}(Ne/10^5). \quad (2)$$

## б) Моделирование детекторов ШАЛ

В экспериментах по ШАЛ, как правило, используются детекторы, обеспечивающие высокий динамический диапазон измерения числа частиц. Данное условие накладывает определенные ограничения на технику съема информации с детекторов. Проблема это разрешается с использованием логарифмических преобразователей (логарифмические АЦП).

Локальные плотности ШАЛ являются мерой для сцинтиляционных детекторов. Свет собирается на фотоумножителе и аналоговый сигнал преобразовывается в код АЦП.

$$K = D \text{Ln} A + C \quad (3)$$

где  $K$  - зарегистрированный код,  $D$  – масштабный фактор (или декремент АЦП),  $A$  выходной сигнал на ФЭУ. Если  $C$  определен как код АЦП ( $K_0$ ), соответствующим средним потери в сцинтиляторе от релятивистко заряженной частицы вертикально падающего на детектор, то  $A$  будет измеряться в единицах числа частиц.

Моделирование АЦП проводится в единицах “число частиц”. В этом случае  $A$  вычисляется по локальной плотности ливня. Флуктуации АЦП определяются флуктуациями  $\langle D \rangle = 9,5$ ;  $\langle K_0 \rangle = 5,5$

и среднеквадратичными отклонениями  $\sigma_{\Delta} \sim (1-3)\%$  и  $\sigma_{\text{КО}} = 0,3$  соответственно.

Через каждые 100 событий значения  $D$  и  $K_0$  обновляются для каждого детектора.

В соответствии с экспериментальной ситуацией проверяют условия “ливневого” триггера:

Из выбранных 11-и триггерных детекторов в любых 7-и должно выработаться энерговыделение соответствующее  $\approx 3,5$  частицам (код АЦП = 17).

Насыщение детекторов достигает при кодах  $\approx 95$ . Временной и программный триггера также проверяются. После проверки условий регистрации события угловые координаты флуктуируют по Гауссовскому распределению: зенитный угол в соответствии с

$$\theta = \pm (1,13 + 0.00023 * \theta^2)^0 \quad (4)$$

, а азимутальный угол –

$$\overline{\phi} = \phi \pm 64,4 / (\theta - 3,16) \quad (5)$$

Используя псевдоэкспериментальный набор кодов АЦП -  $K^1, K^i, \theta$  и  $\phi$  восстанавливаются параметры ливня [4].

## Результаты

На основе выше изложенного алгоритма было сгенерировано  $2 \times 10^6$  события, из них  $\approx 20\%$  было выделено для сравнительного анализа с экспериментальными данными. Условия отбора моделированных событий идентичны с экспериментом. На рис.5 представлено распределение параметра возраста для интервала  $N_e (10^5 - 2 \times 10^5)$ . Как видно из рисунка влияние учитываемых флуктуаций не вносит систематического смещения на среднее значение параметра возраста. Отличия в дисперсиях составляет  $\times 3\%$  и обусловлено (1) условиями моделирования возраста.

На рис.6 представлено распределение  $S(N_e, \theta)$  при  $N_e \geq 5 \times 10^4$  и для трех интервалов зенитных углов

1.  $(0^\circ - 23.8^\circ)$
2.  $(32.4^\circ - 38.7^\circ)$
3.  $(43.1^\circ - 46.8^\circ)$

Интервалы по  $N_e$  выбраны логарифмически равномерными с

шагом 0.1 . Как видно из рисунка в области  $Ne$  до  $10^5$  прослеживается влияние триггера установки на среднюю величину параметра возраста . Аппроксимация (2) монотонная убывающая функция до значения  $Ne \approx 10^6$  . В области  $Ne \approx 10^7$  расхождение моделирования с экспериментом обусловлено недостаточной статистикой из за круто падающей формы спектра (1) .

На рис.7 представлено сравнение моделированных по (1) и экспериментально наблюдаемых спектров по  $Ne$  , для указанных выше трех интервалов зенитных углов . Для полноты сравнения в моделированный спектр была введена точка излома меняющаяся с зенитным углом по закону поглощения ливневых частиц ( пробег поглощения ливневых частиц  $\approx 240$  г/см<sup>2</sup> ) . Наклон спектра после излома принят равным  $Y = 2.9$  и независим от зенитного угла . Точка излома для вертикали соответствуют  $Ne = 1.9 \times 10^6$  . Как видно , моделированный спектр хорошо совпадает с экспериментально наблюдаемым для вертикальных и промежуточных углов . Расхождение последнего углового интервала объясняется принятым приближением углового распределением в виде  $\text{Cos}^p \theta$  .

В области  $Ne$  до  $10^5$  , проявляется низкая эффективность регистрации ливней (сравни с рис.7) .

Согласие моделированных распределений с экспериментально наблюдаемыми указывают на корректность учета функции отклика установки , что позволяет использовать моделированные данные для расчета эффективности установки и коррекции наблюдаемых спектров по  $Ne$  до  $10^5$  .

Достоверная область анализа экспериментально наблюдаемых параметров ШАЛ без учета эффективности установки является область  $Ne > 10^5$  .

## Заключение

- а) разработка алгоритма моделирования отклика установки Макет - Ани
- б) показано , что при флуктуациях детекторов ( АЦП )  $\sigma_{\Delta} \sim (1 - 3) \%$  и  $\sigma_{\text{КО}} \sim 6\%$  систематические смещения в заложенных и восстановленных параметрах ШАЛ не наблюдаются
- в) Согласие экспериментально наблюдаемых спектров и  $Ne$  с моделированными позволяет использовать алгоритмы для расчета эффективности установки при  $Ne \sim 5 \times 10^4$  и расширить области исследований спектров по  $Ne$  .

## ЛИТЕРАТУРА

- D. Heck et al. Report FZKA 66016 (1998) Forschungszentrum Karlsruhe  
Aseykin et al. Preprint FIAN, N31 (in russian).  
Hovsepyan G.G., Proceeding of the Workshop ANI98, (1998)  
Hovsepyan G.G., Proceeding of the Workshop ANI99, (1999)  
Hovsepyan G.G. репу2к , //http://crdlx5/yerphi.am  
Овсепян Г. Г. Отчет по МНТЦ А-116 за 4 кв. 2000г.  
В.С Мурзин . Физика космических лучей 1970 .

## СОДЕРЖАНИЕ

1 . Введение	стр. 1 – 5
2. Исследования космических лучей в области энергий $10^{15}$ - $10^{17}$ эВ методом ШАЛ на горе Арагац	стр . 5 – 6
3. Моделирования отклика установки Макет-Ани	стр . 6 – 8
4. Результаты	стр . 8 –9
5. Заключение	стр . 9
6. Графики	стр . 10 – 12
7. Литература	стр . 13