

Эксперимент ГАММА на г. Арагац в Армении - статус 2014 и последние результаты

Ромен Мартиросов (ЕрФИ)
Виктор Павлюченко (ФИАН)



33 РККЛ, Дубна, 11-15 Августа, 2014

ГАММА эксперимент (ЕрФИ– ФИАН)



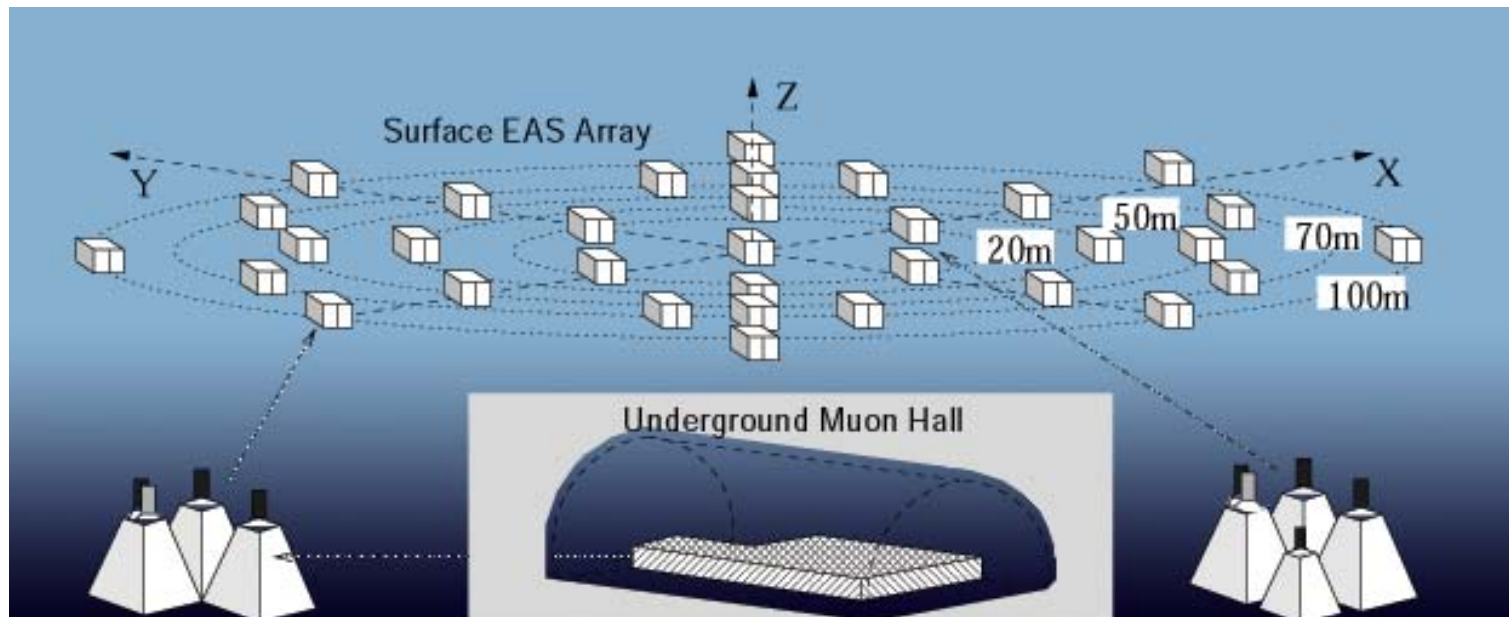
Научная станция АРАГАЦ (поздняя осень)

Южный склон г. Арагац, Армения, 65 км от Еревана

Elevation: 3200 m a.s.l. (700 g/cm² of atmospheric depth)

Geographical coordinates: Latitude = 40.47° N, Longitude = 44.18° E

ГAMMA установка



Исследование космических лучей и гамма-квантов с энергией 10^{14} – 10^{17} эВ

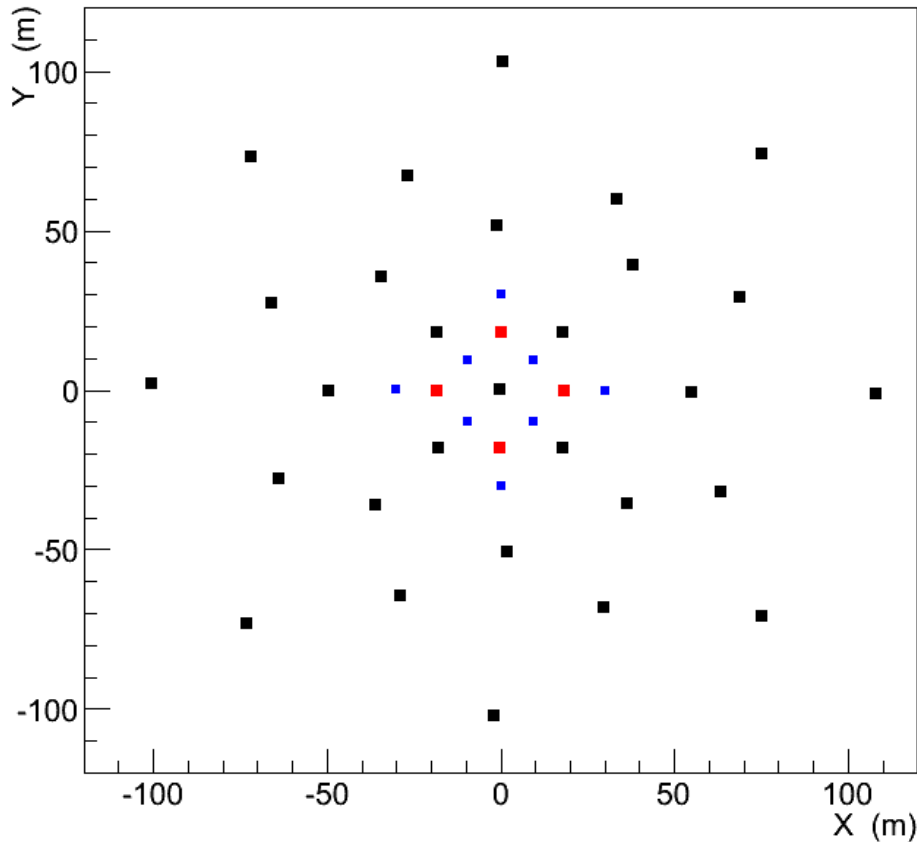
Исследование характеристик ШАЛ

- Пространственное распределение электронов и мюонов;
- Возраст ливней и его зависимость от Ne;
- Исследование мюонов с энергией > 5 ГэВ;
- Спектр ШАЛ по числу частиц.

Астрофизические проблемы и гамма-астрономия

- Исследование энергетического спектра и массового состава ПКИ;
- Исследование диффузного потока первичных гамма-квантов;
- Исследование природы колена в спектре ПКИ (*результат 2014 г.*).

ГАММА -2011 (после нескольких модификаций)



*Наземная часть
(эл.-фот. компонента)*

116 сцинтилляционных
детекторов (1 кв.м)
на концентрических
кругах от 0 до 100 м.

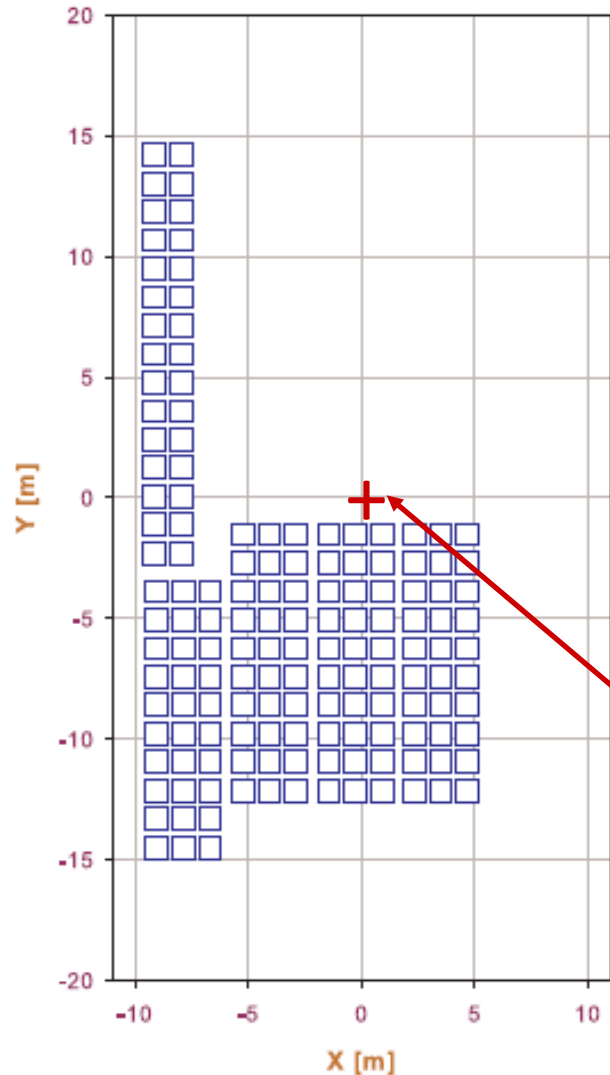
**Общая площадь ~ 30.000
кв.м.**

**Хронотрон из 33 каналов
для определения
угловых координат ШАЛ**

Энергетическая область 10^{14} – 10^{17} эВ

Дубна 11 - 15 авг 2014

Ковер мюонных детекторов (2006 – 2012)



150 метровых сцинтилляционных детекторов

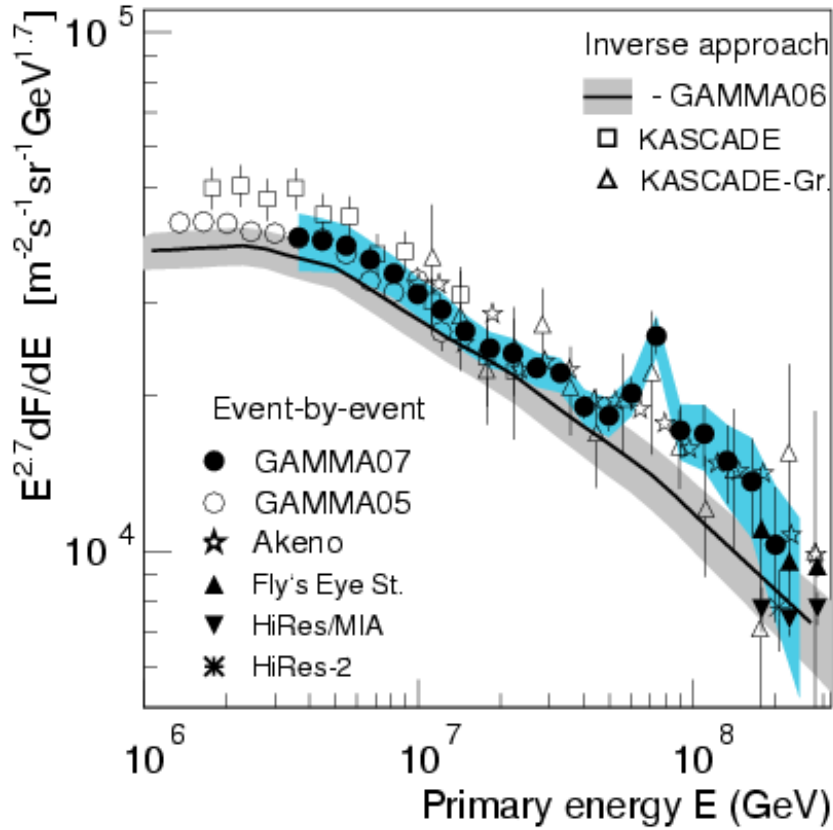
Геометрический центр ГАММА

Энергетический порог – 5 ГэВ

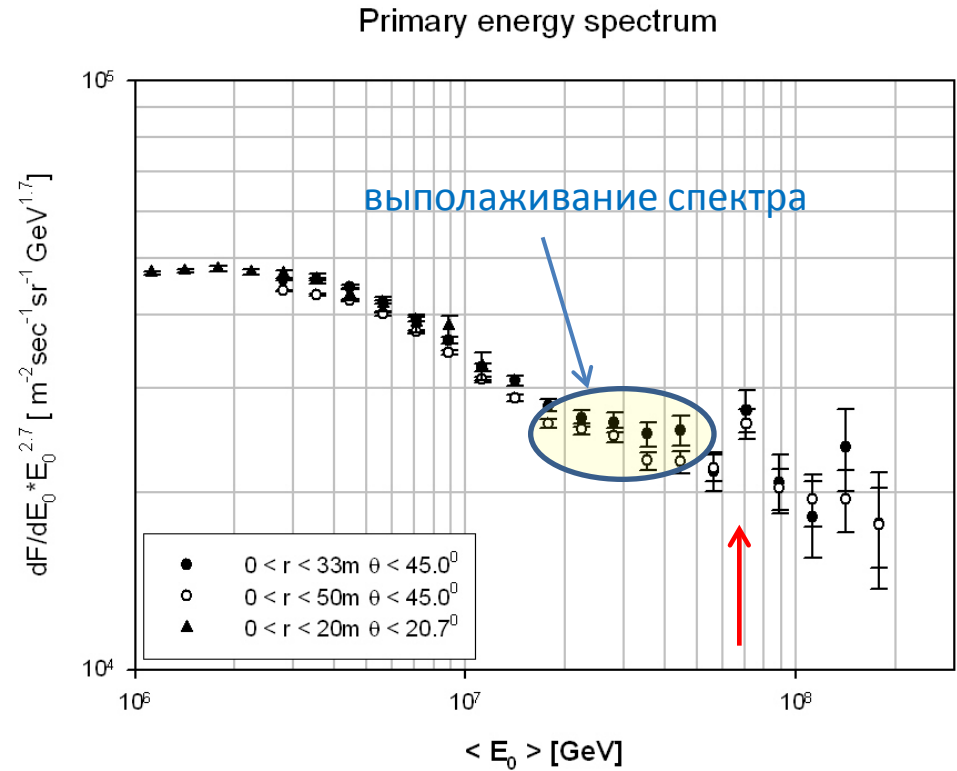
Muon detectors disposition in the underground hall

Дубна 11 - 15 авг 2014

Энергетический спектр



2008 год



2012 год

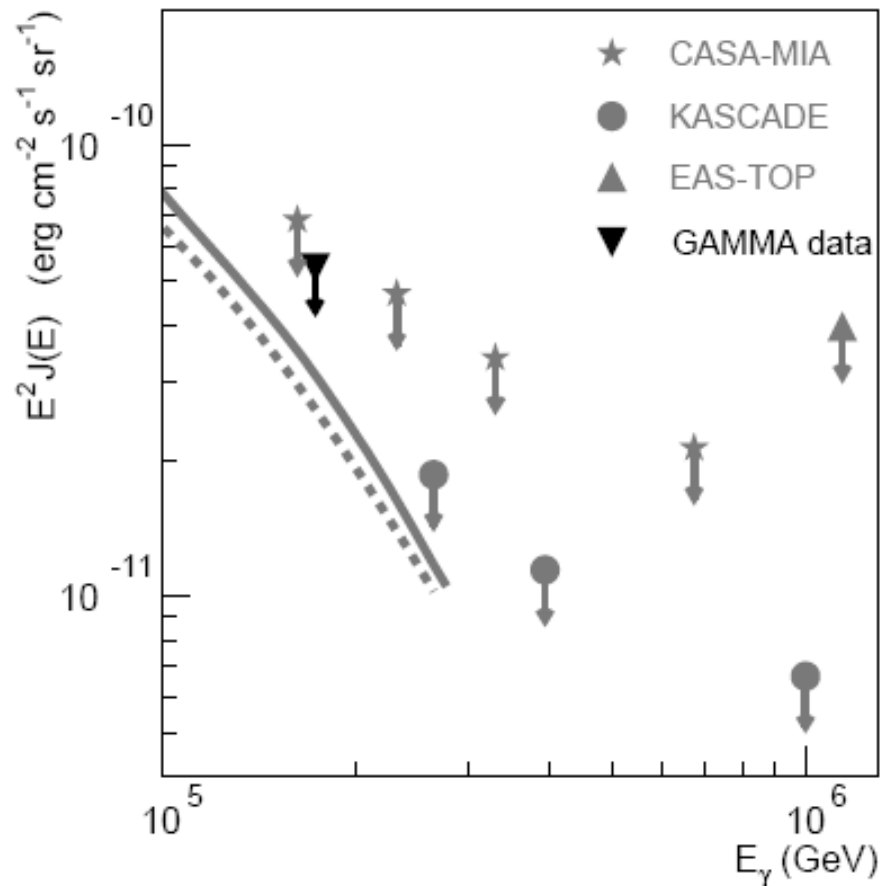
$$\ln E_1 = a_1 x + a_2 \sqrt{s/c} + a_3 c + a_4 + a_5 / (x - a_6 y) + a_7 y e^s$$

where $x = \ln N_{ch}$, $y = \ln N_{\mu}$ ($R < 50m$), $c = \cos(\theta)$

Исследование первичных гамма-квантов

Критерии отбора гамма-ливней

- 1) Радиус отбора ШАЛ $R < 15\text{м}$;
- 2) Зенитный угол прихода ШАЛ $\theta < 30^\circ$;
- 3) Размер ливня $N_{ch} > 10^5$;
- 4) Возраст ливня $0.4 < s < 1.5$;
- 5) Отсутствие сработавших мюонных детекторов в ливнях, удовлетворяющих предыдущим 4 условиям



Верхний предел диффузного потока гамма-квантов

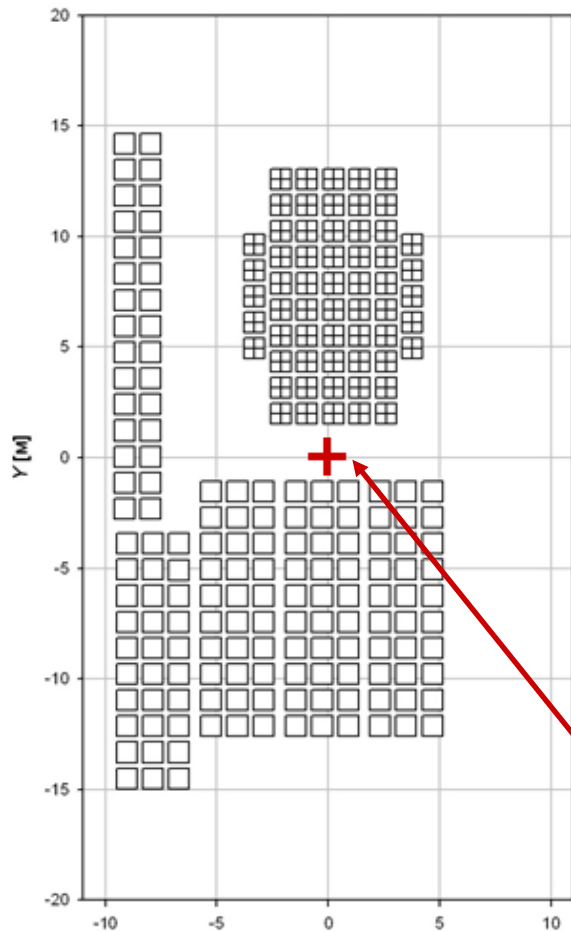
Хорошее согласие с экспериментом CASA-MIA

Линии – ожидаемый Галактический диффузный поток

[[Aharonian, F. A., A. M. Atoyan 2000, Astron. Astrophys. 362,](#)

[937](#)

Модернизация мюонного ковра (март 2012 года)



Общее число детекторов – 210 (было 150)

Геометрический центр ГАММА

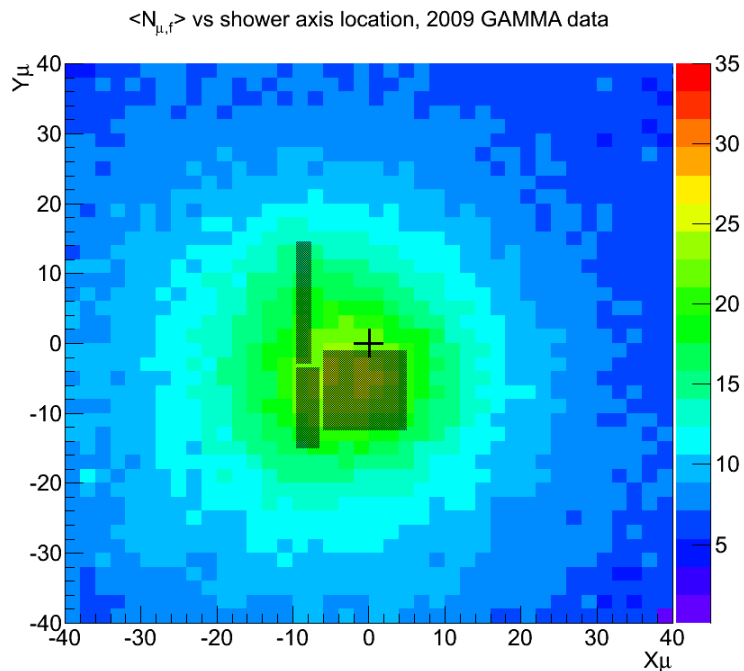


60 дополнительных детекторов

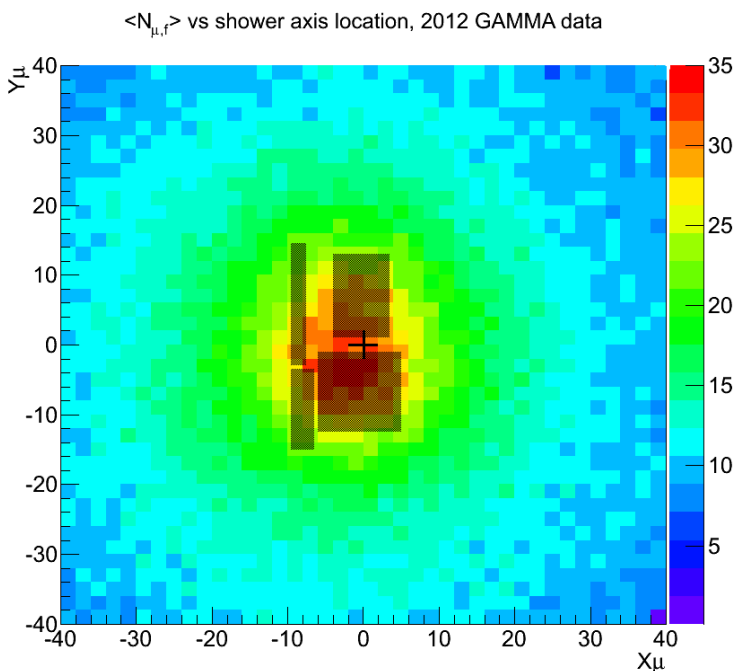
Дубна 11 - 15 авг 2014

Распределение среднего числа сработавших мюонных детекторов N_μ как функция положения оси ливня (X_μ, Y_μ) на уровне расположения мюонных детекторов

Данные 2009 г. (150 детекторов)



Данные 2012 г. (210 детекторов)



1. Увеличение числа мюонных детекторов на 40% (со 150 до 210) и более симметричное их расположение позволит улучшить эффективность отбора ШАЛ, генерированных первичными гамма-квантами.

2. Улучшит оценку первичной энергии и массового состава при использовании многопараметрического анализа с информацией о мюонах в ШАЛ

$$\text{Ln}(E_0) \approx \text{Ln}(E_1) = f(N_{\text{ch}}, N_\mu, s, \cos\theta)$$

Дубна 11 - 15 авг 2014

Результат 2014 года

Приведена экспериментальная проверка работоспособности разностного метода, предложенного В.П. Павлюченко, для определения природы колена в спектре первичного космического излучения.

Получено статистически обеспеченное указание на существование близкого источника в Южном полушарии неба.



Спасибо!

GAMMA experiment
<http://gamma-armenia.org>

Разностный метод

Предположения

1. **Установка** при фиксированных триггерных условиях работает с одинаковой **светосилой** независимо от времени суток и времени года, что обеспечивает одинаковые условия наблюдения разных направлений при вращении Земли.
2. По пути от источника до Земли заряженные частицы испытывают многократное рассеяние в хаотичных магнитных полях (диффузия).
 - Тогда изображение источника расплывается – чем дальше источник, тем сильнее, вплоть до полной неразличимости (радиус чувствительности), при отсутствии выделенного магнитного поля расплывание аксиально симметрично
 - *Происходит сепарация частиц с разными коэффициентами диффузии (близкий аналог – заход солнца)*

Разностный метод

«Слепой» поиск аномалий на небесной сфере.

- Вся область наблюдений по числу событий разбивается на две равные части: одна в заданном направлении (l_0, b_0) , а другая – в противоположном $(l_0 - 180^\circ, -b_0)$. **Аномалия предполагается там, где характеристики ШАЛ, пришедших из разных частей, максимально отличаются друг от друга.**
- Для этого в обоих наборах событий строятся распределения экспериментального параметра, и эти распределения, после приведения их к одинаковым условиям, вычитаются друг из друга.
- Приведение к одинаковым условиям означает :
введение одинаковых границ интервалов в обоих распределениях;
выбор такого угла ψ_0 (или $H_0 = \text{Cos } \psi_0$) раствора конуса вокруг направления (l_0, b_0) , чтобы число событий $n = n^{anti}$ в обоих наборах, причем события при $H \geq H_0$ – приходят с заданного направления, а при $H < H_0$ – с противоположного.
Здесь для ливня с углами (l, b)

$$H = \text{Cos } \psi = \text{Sin } b_0 \text{Sin } b + \text{Cos } b_0 \text{Cos } b \text{Cos } (l - l_0)$$

В разностном методе автоматически вычитается общий фон и возможные методические ошибки, т.к. они одни и те же в обоих наборах.

Разностный метод

Разбиение небесной сферы при сканировании

Последовательно выбираются направления l_0, b_0 .

Разбиение проводится так, чтобы полное число событий делилось пополам путем подбора угла Ψ_0 (угол раствора конуса вокруг **lobo**).

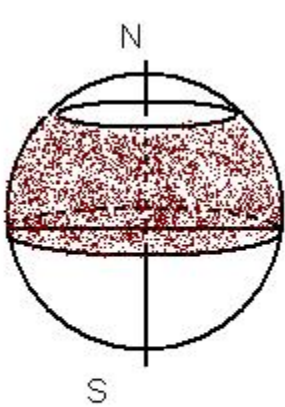


Рис. 1

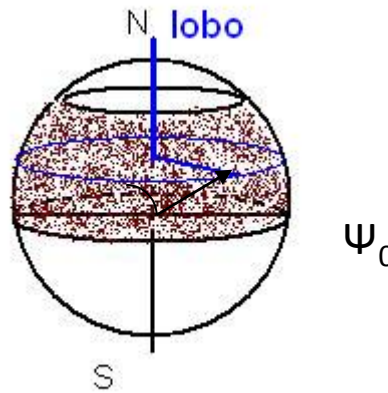


Рис. 2

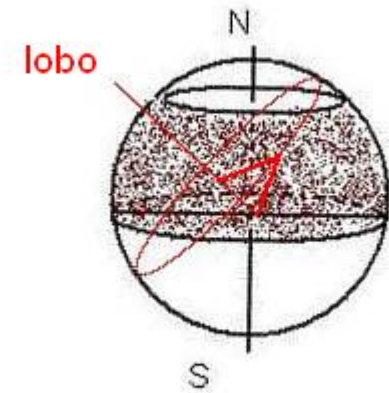


Рис. 3

Установка находится в центре сферы и вращается вокруг оси NS.

1. Полоса наблюдений на небесной сфере (экваториальные координаты).
2. Исследуемое направление **lobo** совпадает с осью вращения Земли.
3. **lobo** повернуто на произвольный угол относительно оси вращения Земли.

Разностный метод

- Численным параметром отличия распределений является величина

- χ^2/J , где

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{\Delta_i}{\sigma_i} \right)^2$$

- а J - число степеней свободы. $\Delta_i = m_i - m_i^{anti}$ разность между распределениями в интервале i , среднеквадратичная ошибка σ_i этой разности вычисляется из распределения Пуассона

- $$\sigma_i = \sqrt{m_i + m_i^{anti} + 1} = \sqrt{n_i + 1}$$

где n_i – полное число событий в интервале i , не зависит от углов (l_0, b_0) .

- Независимость n_i и σ_i важна для сравнения значений χ^2/J между собой при сканировании небесной сферы в поисках направления **с максимальным отличием распределений** (максимум χ^2/J). Равенство $n = n^{anti}$ позволяет на установке с ограниченным сектором обзора **исследовать всю небесную сферу** в пределах чувствительности метода.

Первичная обработка

Отбирались ШАЛ с числом заряженных частиц $N_e > 10^5$, с зенитными углами $\theta < 40^\circ$ в лабораторной системе координат и с осями в радиусе $R < 60$ м от центра установки.

Число событий 3.38 млн. при живом времени 11544 часа. (последние 3 года работы)

- Для каждого ШАЛ в дальнейшем использовались:

- время прихода ШАЛ по Гринвичу;

- **мощность ливня N_e**

- зенитный и азимутальный углы θ, φ в лабораторной системе координат

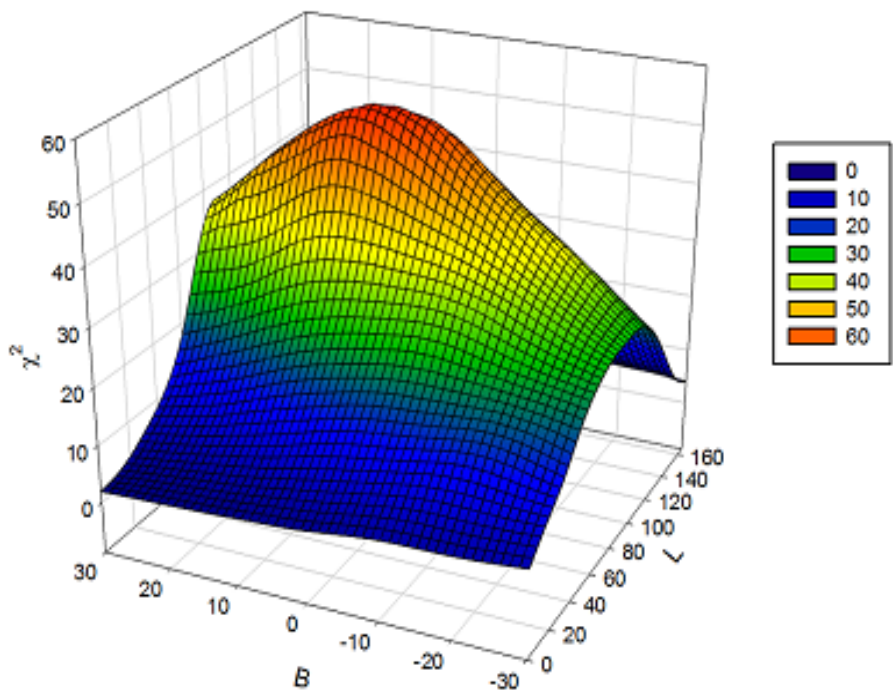
- **небесные координаты прихода ШАЛ;**

- так называемый **«поперечный» возраст ливня S** , вычисленный из функции пространственного распределения в аппроксимации Нишимуры-Каматы-Грейзена (НКГ);

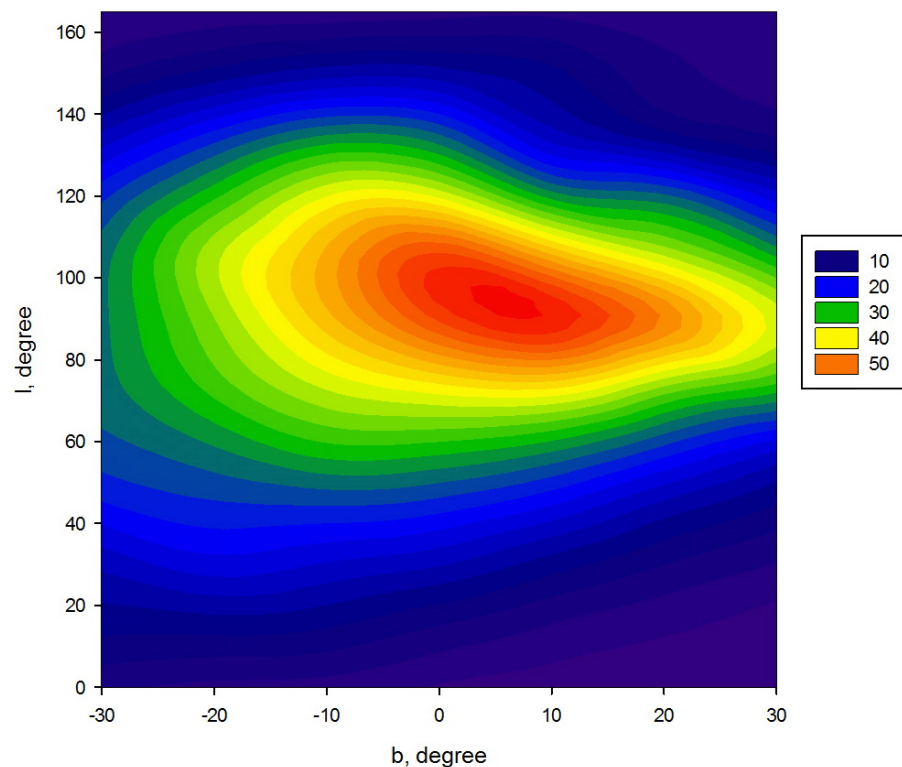
$$\rho(N_e, r, S) = 0.366 \frac{N_e}{r_0} S^2 (2.07 - S)^{5/4} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{S-2} \left(1 + \frac{r}{r_0} \right)^{S-4.5}$$

Слепой поиск максимума χ^2/J для параметра S

Галактические координаты



Галактические координаты



Трёхмерная диаграмма

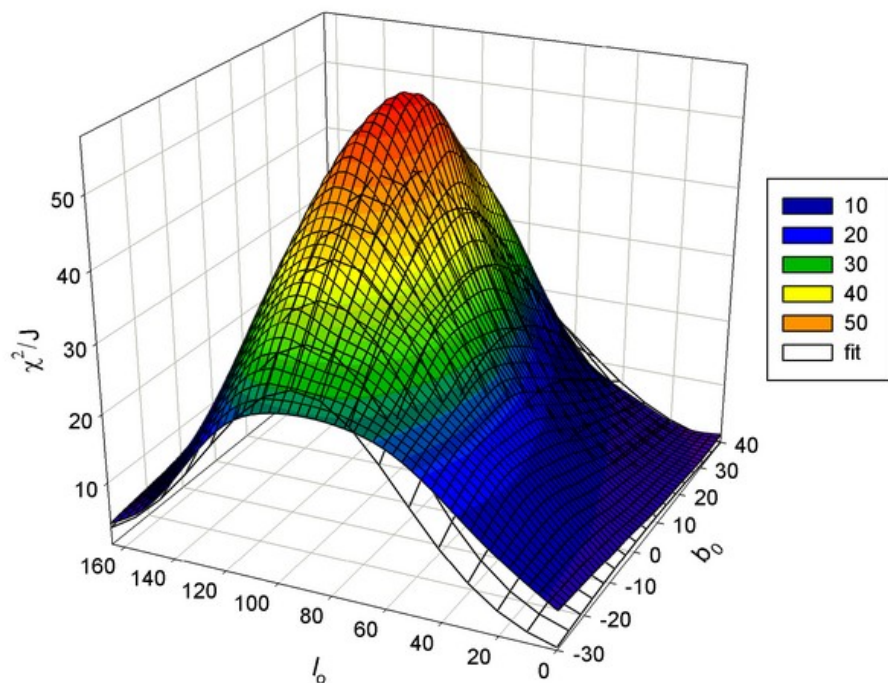
Контурная диаграмма (вид сверху)

Локализованный максимум χ^2/J в направлении $(l_o = 97^\circ \pm 3^\circ, b_o = 5^\circ \pm 3^\circ)$

или $(l_o = 277^\circ \pm 3^\circ, b_o = -5^\circ \pm 3^\circ)$

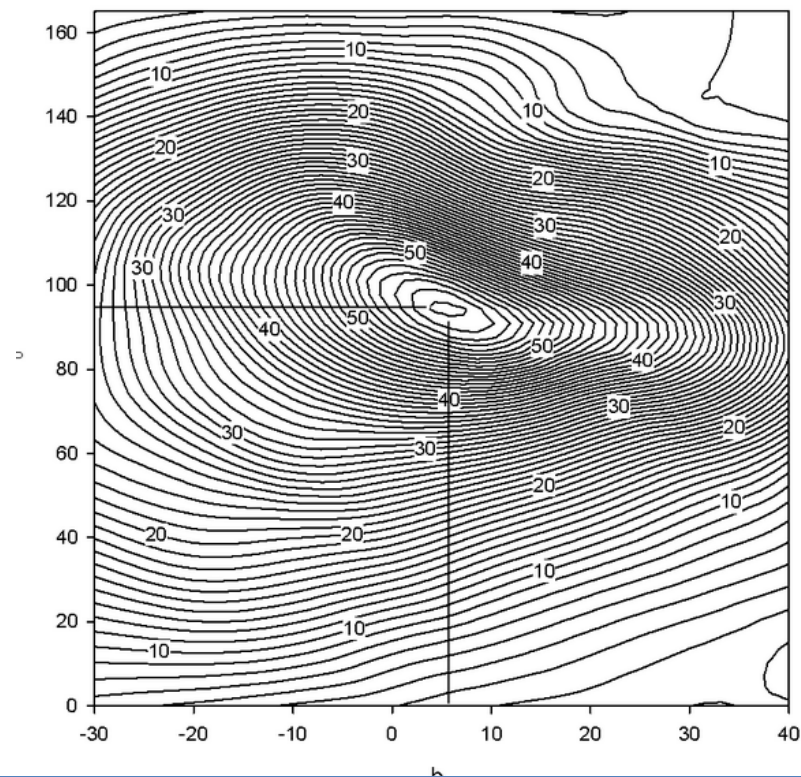
Слепой поиск максимума χ^2/J для параметра S

Галактические координаты



Трёхмерная диаграмма

Галактические координаты

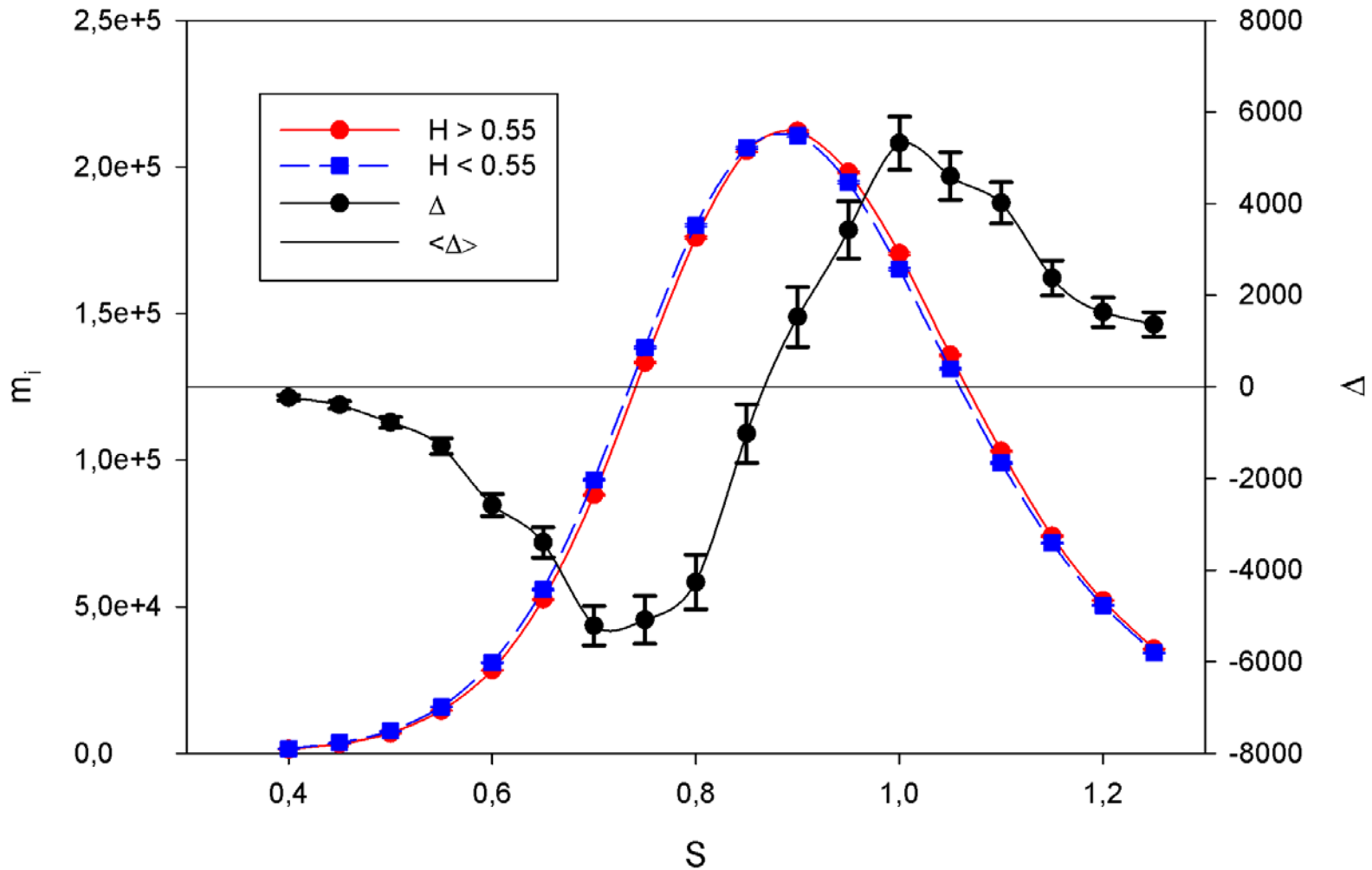


Контурная диаграмма (вид сверху)

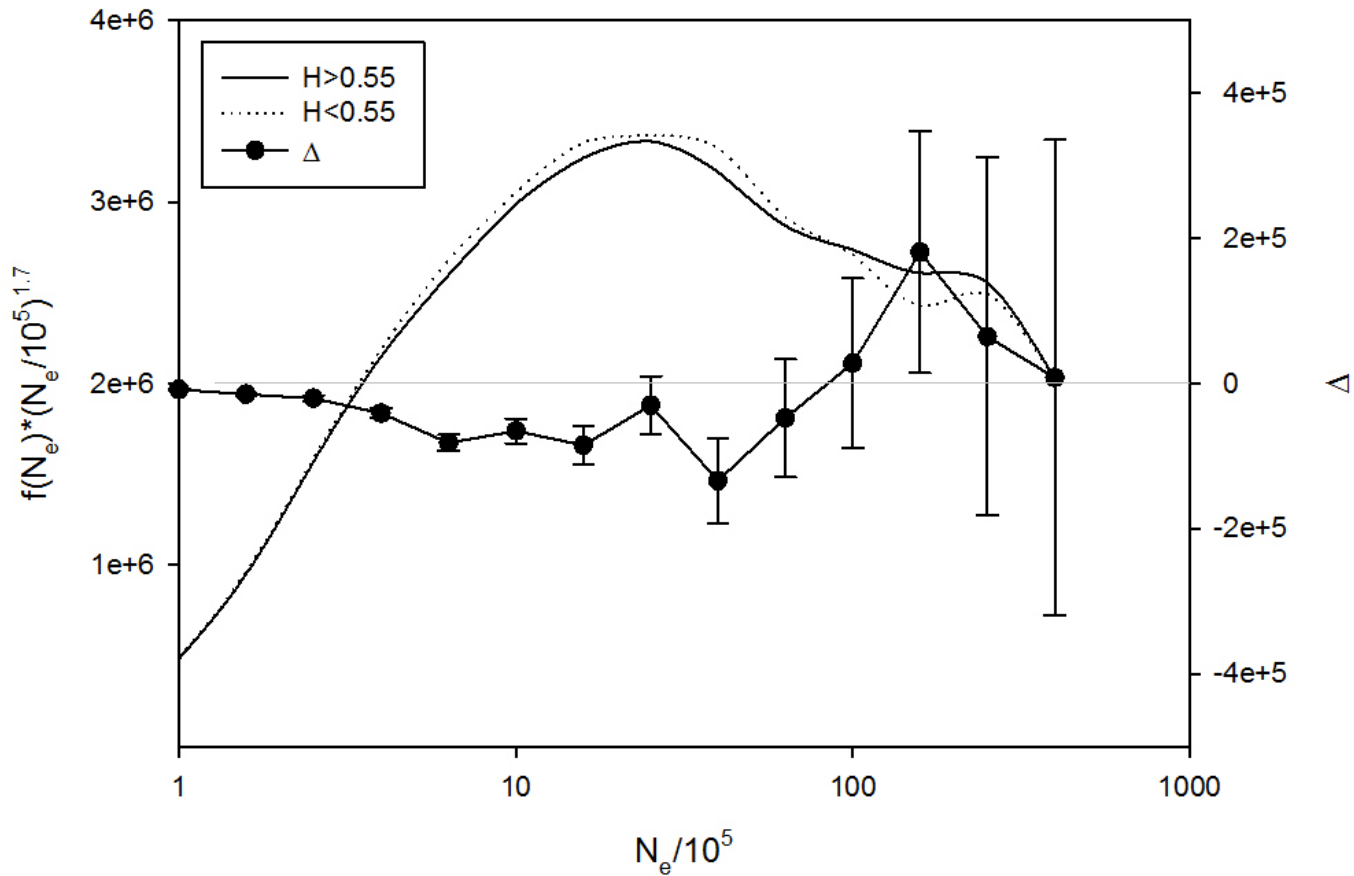
Локализованный максимум χ^2/J в направлении $(l_0 = 97^\circ \pm 3^\circ, b_0 = 5^\circ \pm 3^\circ)$

или $(l_0 = 277^\circ \pm 3^\circ, b_0 = -5^\circ \pm 3^\circ)$ **Двумерный Гаусс $l_0 = 90.3^\circ, b_0 = 0.1^\circ$**

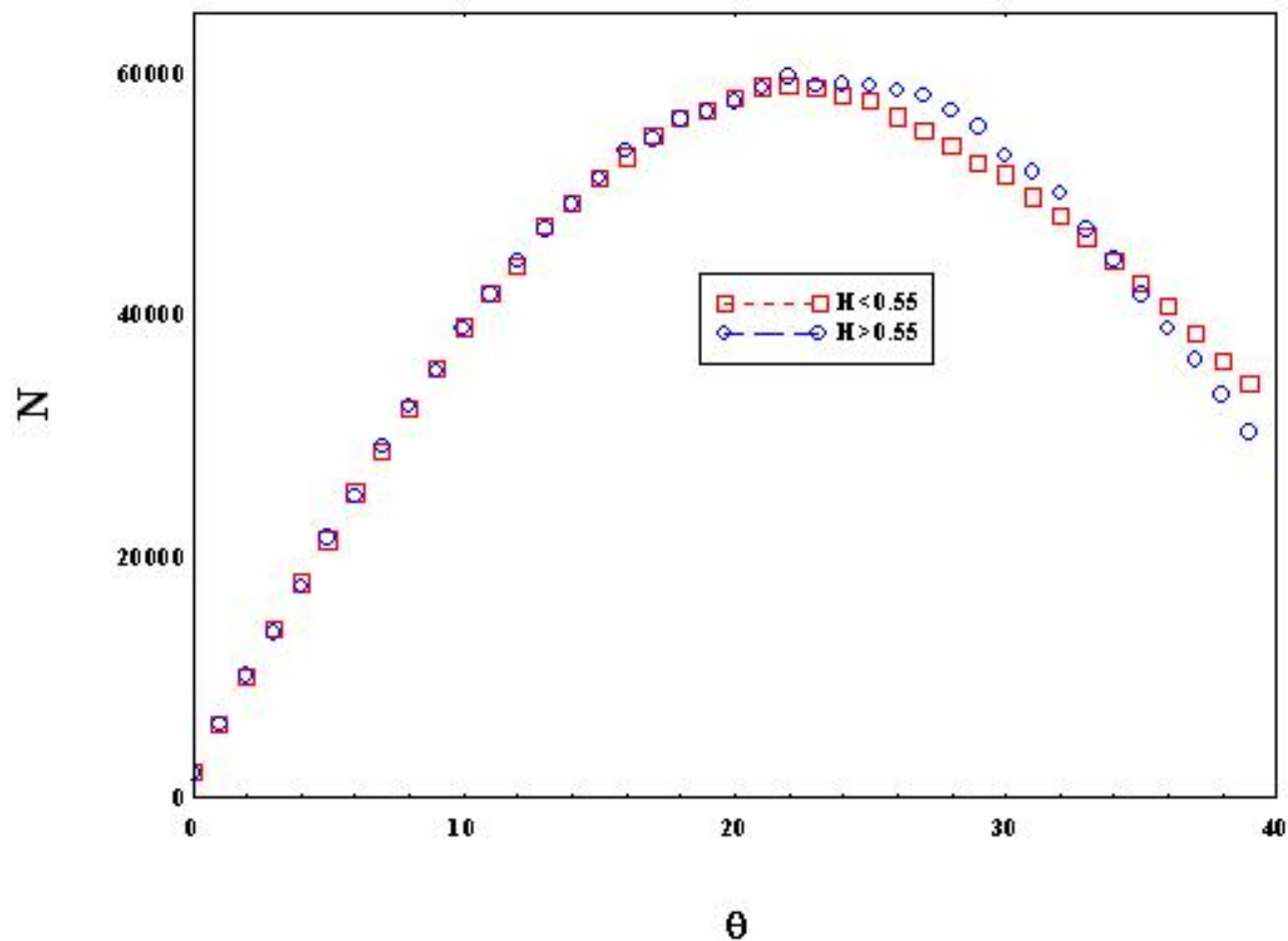
Параметр S в направлении $l_o = 97^\circ, b_o = 5^\circ$ ($l_o = 277^\circ, b_o = -5^\circ$)



Параметр n $N_e^{1.7}$ в направлении $l_o = 97^\circ, b_o = 5^\circ$
 $(l_o = 277^\circ, b_o = -5^\circ)$ ($\alpha = 140^\circ$ (9h20m), $\delta = -57^\circ$)

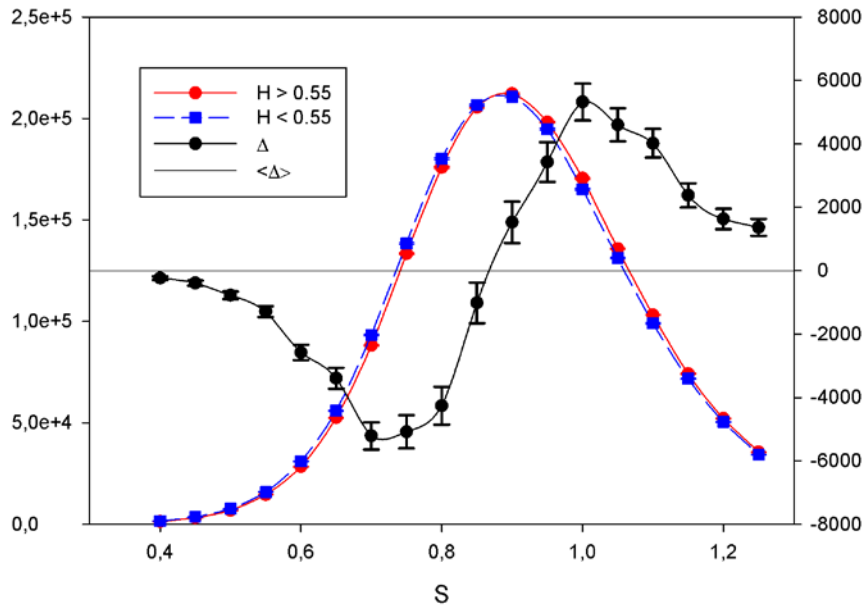


Распределение ШАЛ по θ в направлении $l_0 = 97^\circ, b_0 = 5^\circ$ ($l_0 = 277^\circ, b_0 = -5^\circ$) Лабораторная система



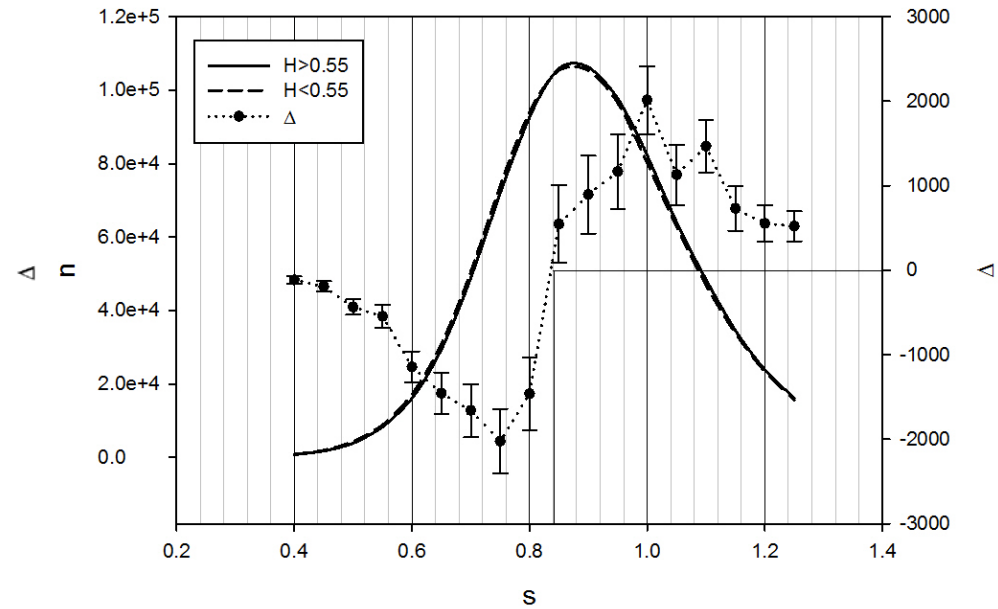
Параметр S в направлении $l_0 = 97^\circ, b_0 = 5^\circ$ ($l_0 = 277^\circ, b_0 = -5^\circ$)

Ne > 10⁵ : 3862987 teta = 0 – 40, R < 50 : 3382892



$\chi^2/J = 57.64$

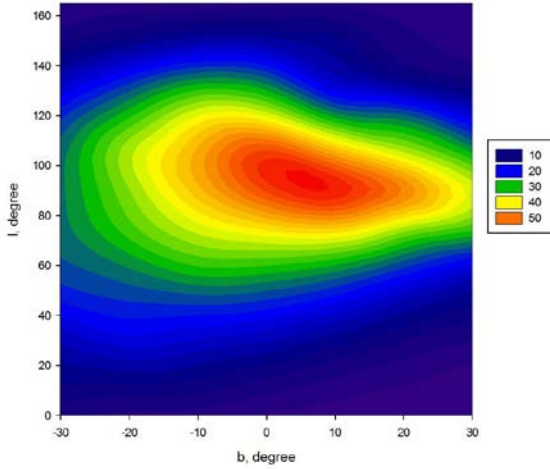
Ne > 1.0e5 : 3862967 teta = 0 - 25 : 1959129 R < 50 : 1707987



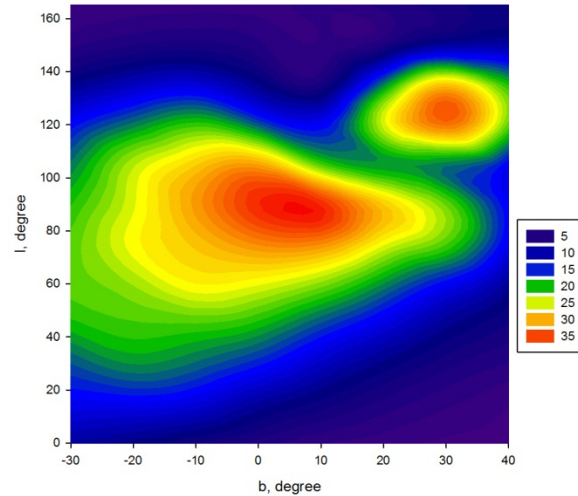
$\chi^2/J = 16.69$

χ^2/J для S

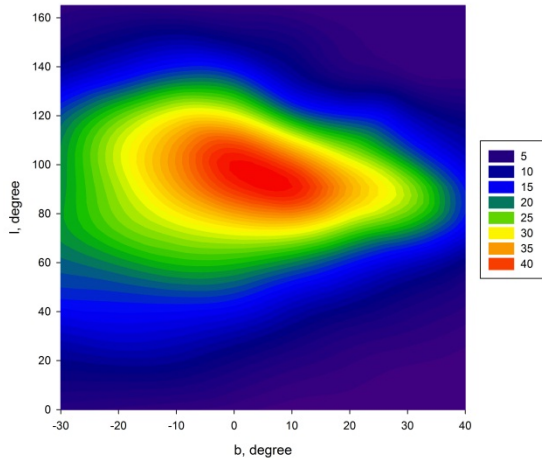
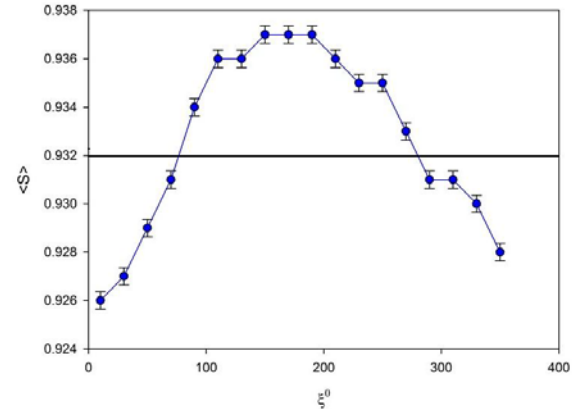
Без искажений
57.64



при $45 < \xi < 60$ $S = S + 0.07$
34.54

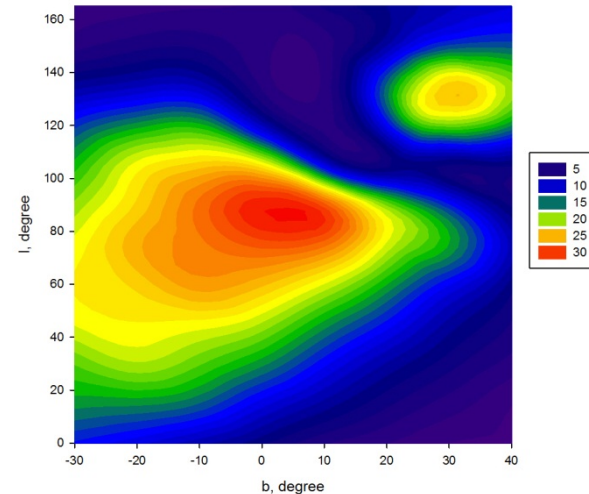


«Синус»



случайные
ошибки S
 $\sigma = 0.1$
42.71

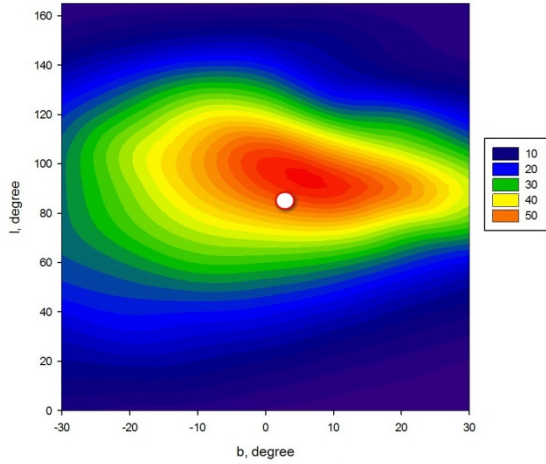
«Анти
Синус»
26.27



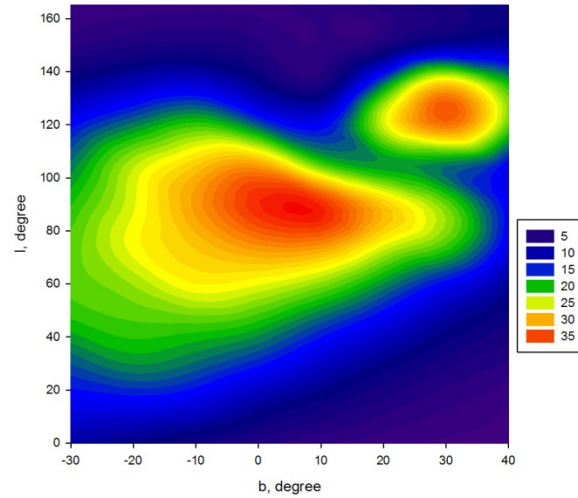
Разделяются эффекты, связанные с установкой и связанные с неподвижной системой небесных координат

χ^2/J для S

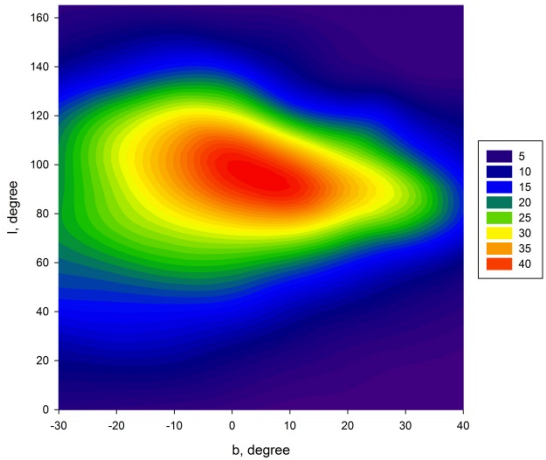
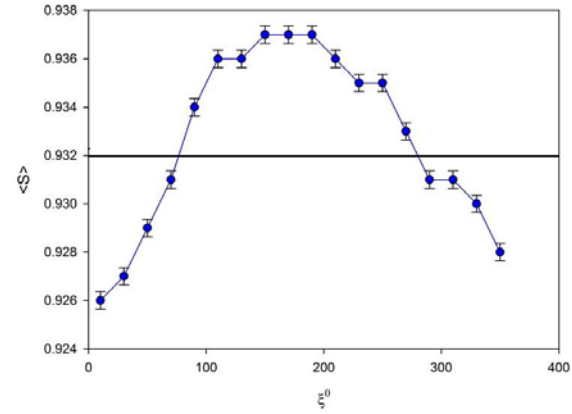
Без искажений
57.64



при $45 < \xi < 60$ $S = S + 0.07$
34.54

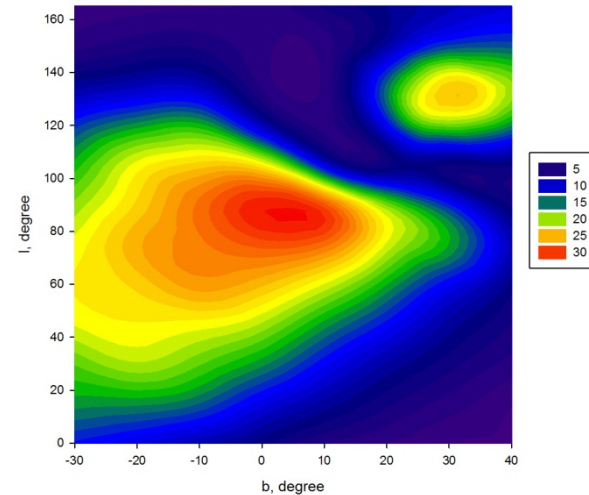


«Синус»



случайные
ошибки S
 $\sigma = 0.1$
42.71

«Анти
Синус»
26.27



Разделяются эффекты, связанные с установкой и связанные с неподвижной системой небесных координат

Результаты

- Максимальное значение χ^2/J для S в точке $l_0 = 277^\circ \pm 3^\circ$, $b_0 = -5^\circ \pm 3^\circ$ ($\alpha=140^\circ$ (9h20m), $\delta = -57^\circ$) составляет 57.64 ± 0.34 при 17 степенях свободы (минимум равен 1.32 ± 0.34 при $l_0 = 15^\circ \pm 10^\circ$, $b_0 = 60^\circ \pm 10^\circ$). **Двумерный Гаусс $l_0 = 270.3^\circ$, $b_0 = -0.1^\circ$**
- Вблизи точки максимума находится кластер в созвездии Vela с двумя остатками сверхновых **Vela X (263.9°, -3°)** и **Vela Jr (266.2°, -1.2°)**, расстояния до которых составляют около 0.3 и 0.2 кпс соответственно. Является хорошим кандидатом на близкий источник ПКИ.
- Избыток «молодых» ШАЛ с этого направления свидетельствует о процессе сепарации по коэффициенту диффузии на пути от источника до Земли. Более «молодые» ливни характеризуют более легкий состав ПКИ. Поток ПКИ по пути обогащается протонами в направлении источника, приводя к «облегчению» состава и «омоложению» ШАЛ, пришедших со стороны источника, по сравнению с ливнями с обратной стороны.

Заключение

- Основное отличие метода – разностное исследование *характеристик*, а не *интенсивности* ШАЛ.
- В качестве экспериментальных параметров, кроме возраста S , могут использоваться другие характеристики ШАЛ и их комбинации.
- Требуется независимое подтверждение

Спасибо !