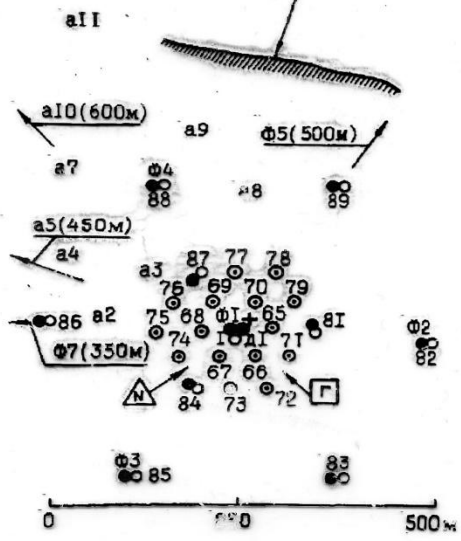
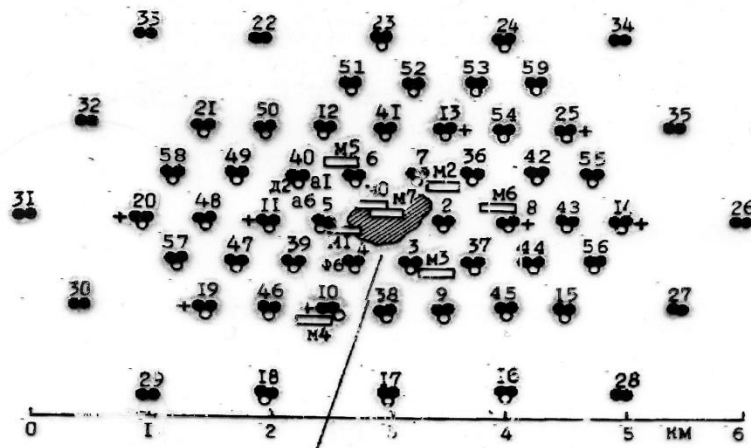


**Корреляция радиосигнала на  
частоте 32 МГц с  
характеристиками широких  
атмосферных ливней в  
области энергий  
 $10^{16}$  –  $10^{19}$  эВ**

***Кнуренко С.П., Петров И. С***

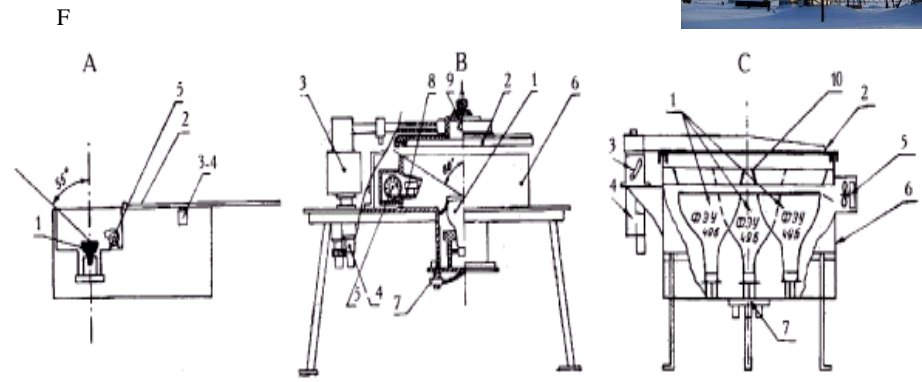
Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю. Г. Шафера  
Докладчик – Петров И. С. ([igor.petrov@ikfia.sbras.ru](mailto:igor.petrov@ikfia.sbras.ru))

# Якутская установка широких атмосферных ливней

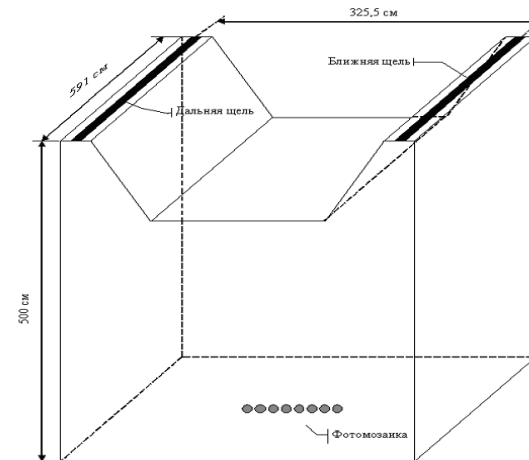


### Conditional notations

- - scintillation detector 2 m<sup>2</sup>
- - Cherenkov detector
- - muon detector
- ⊙ - scintillation detector 0.25 m<sup>2</sup>



Cherenkov integral detectors which use at Yakutsk array



Cherenkov tracing detector

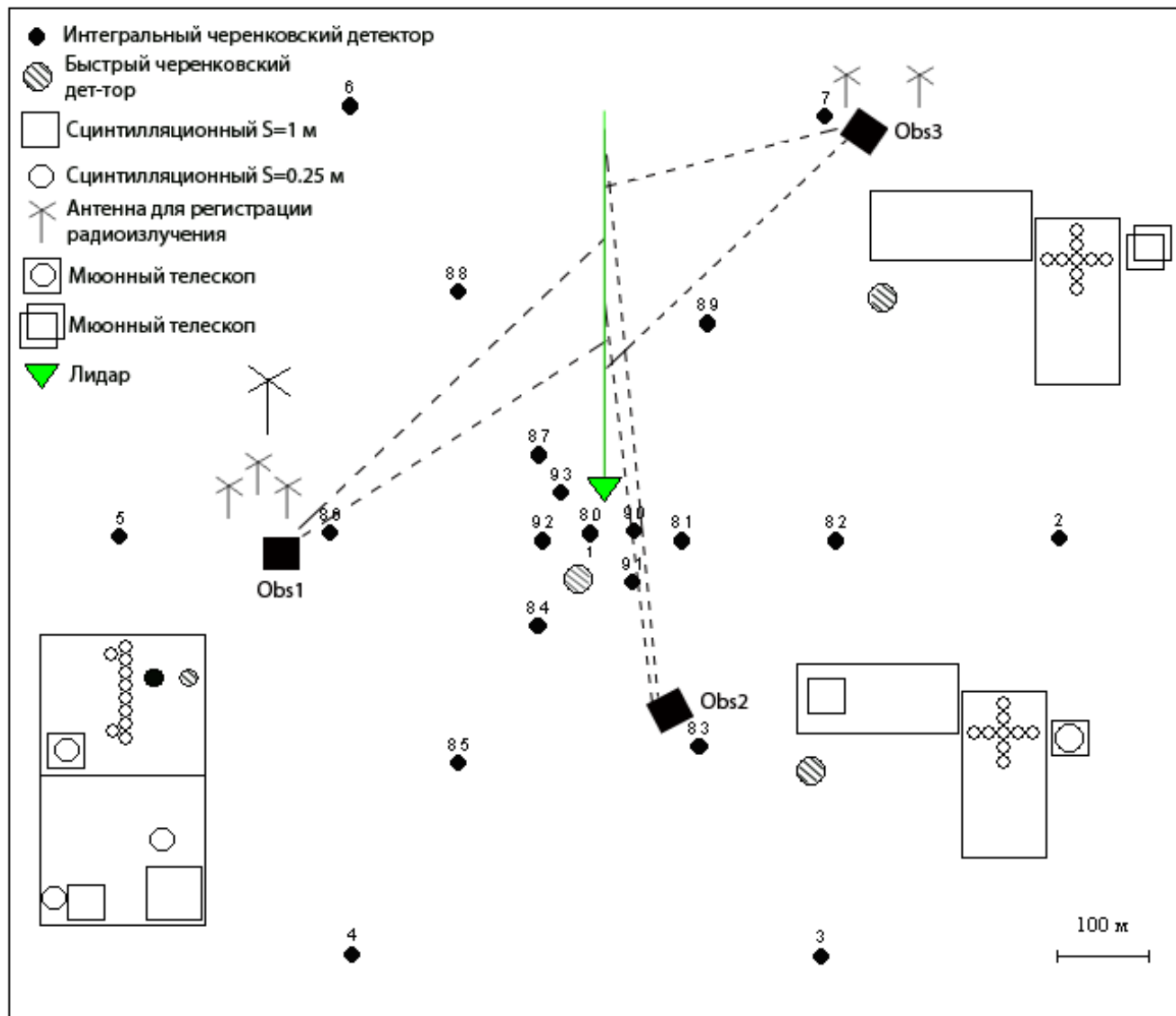
Fig.1. The location of detectors at the Yakutsk array in different times

# Приемная антенна радиоизлучения



Якутская установка измеряет три компоненты широких атмосферных ливней:

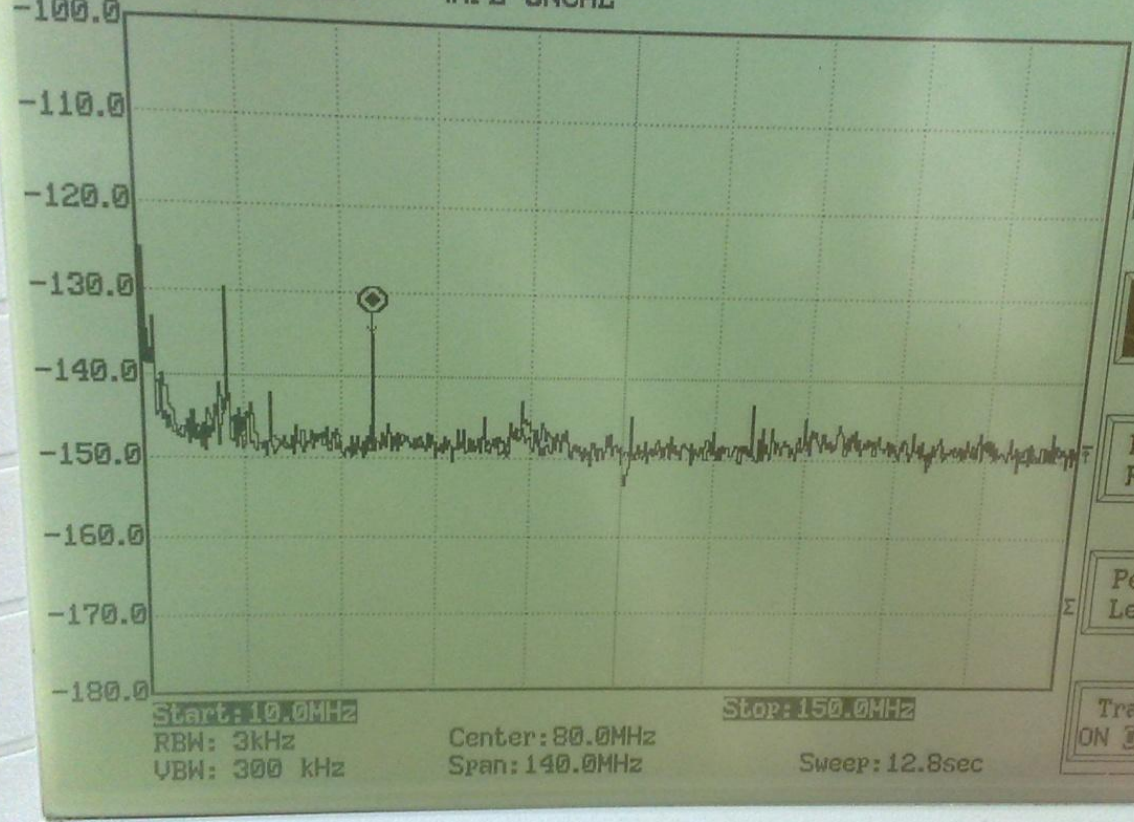
- общая заряженная компонента;
- мюонная компонента;
- Черенковское излучение.



TUE JUN 26, 2012  
TG Level: 0.0 dBm  
Ref Lvl: -100.0 dBm  
-100.0

09:12:09  
INT REF  
MPL UNCAL

Marker Level Freq(MHz)  
-134.8 42.48



- To Peak
- Mkr-> Center
- Next Peak
- Peak Right
- Peak Left
- Track ON OFF

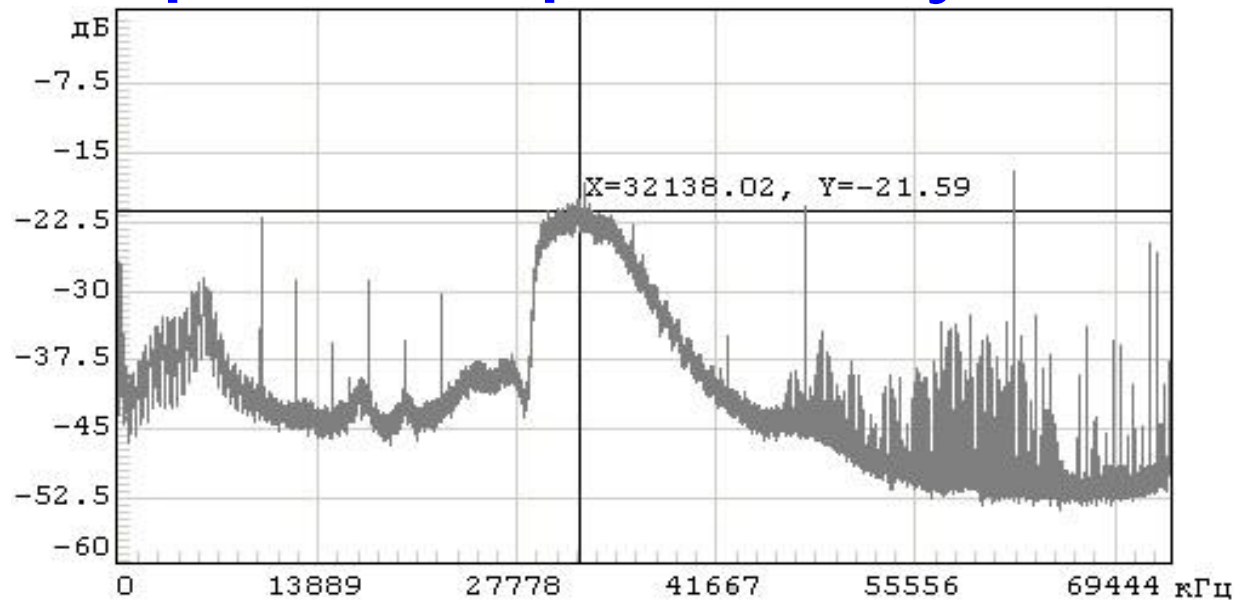
- F
- F 2
- F 3
- F 4
- F 5
- F 6

**GW INSTEK GSP-827**

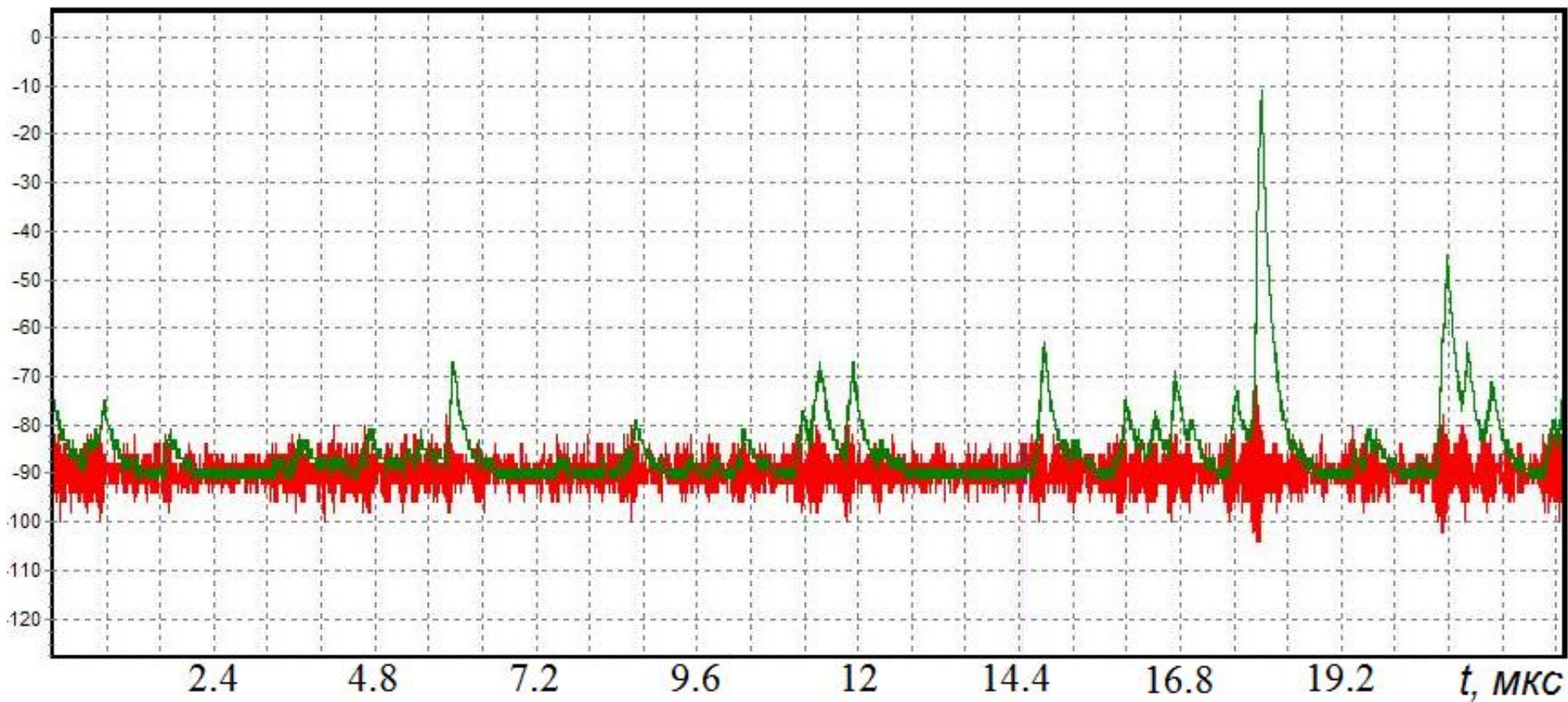
АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА  
2.7G Hz

ГК  
05

# Уровень радиозумов



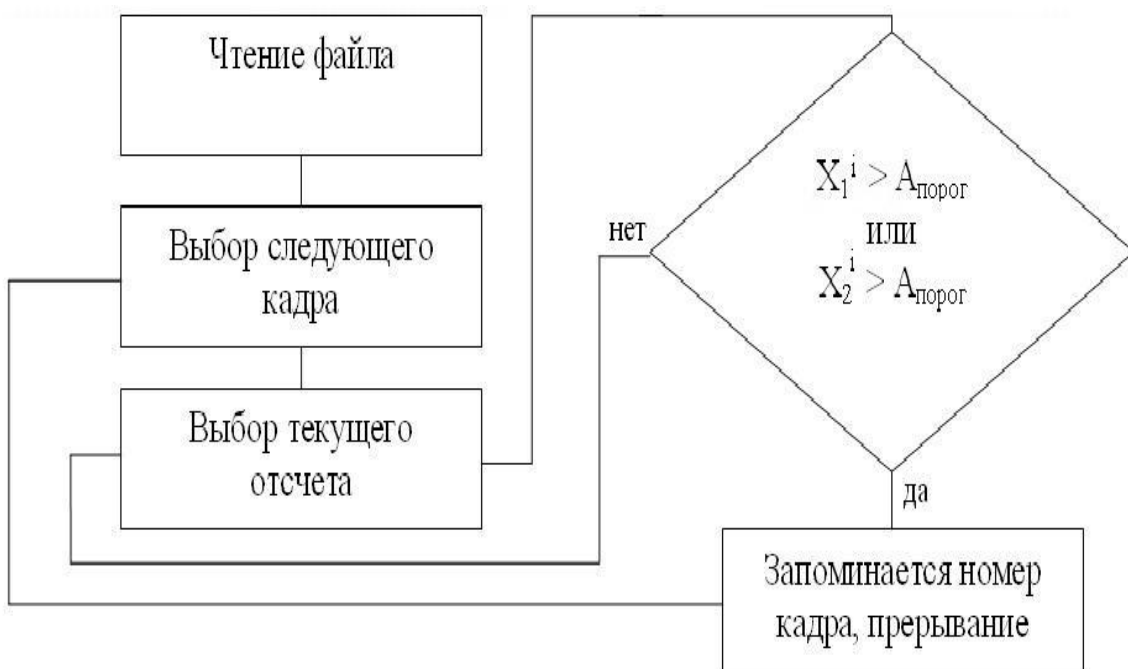
# Детектирование сигнала



# Алгоритм отбора радиоимпульсов на фоне шумов

В зависимости от угла прихода, азимутального и зенитного углов:

- Зенитный угол  $\theta \leq 35$  ;
- Азимутальный угол  $\varphi$  выбирается таким образом, чтобы исключить поляризационный эффект.



Ось ливня должна быть в пределах периметра центральной установки с радиусом 600 м;

Амплитуда радиоимпульса должна быть в 5 раз больше уровня шумов и импульс локализован в зоне временных ворот соответствующих задержке «мастера» от большой и малой установок

# Оценка амплитуды

$$f[t] = 1/N \cdot F[t] = 1/N \cdot \sum s_i[t]$$

$F[t]$  – ненормированная напряженность поля сформированной полосы,

$f[t]$  – нормированная напряженность поля,

$N$  – число антенн,

$s_i[t]$  – время смещения напряженности поля одиночных антенн.

$$cc[t] = \pm \sqrt{\left| \frac{1}{N_{Pairs}} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j>i}^N s_i[t] s_j[t] \right|}$$



# Расчет напряженности поля

Напряженность электрического поля:

$$\mathbf{E} = \sqrt{\frac{4\pi\nu^2\mu_0}{G(\theta,\phi,\nu)c A_{ele}(\nu)R_{ADC}} \frac{1}{V_{ADC}}}$$

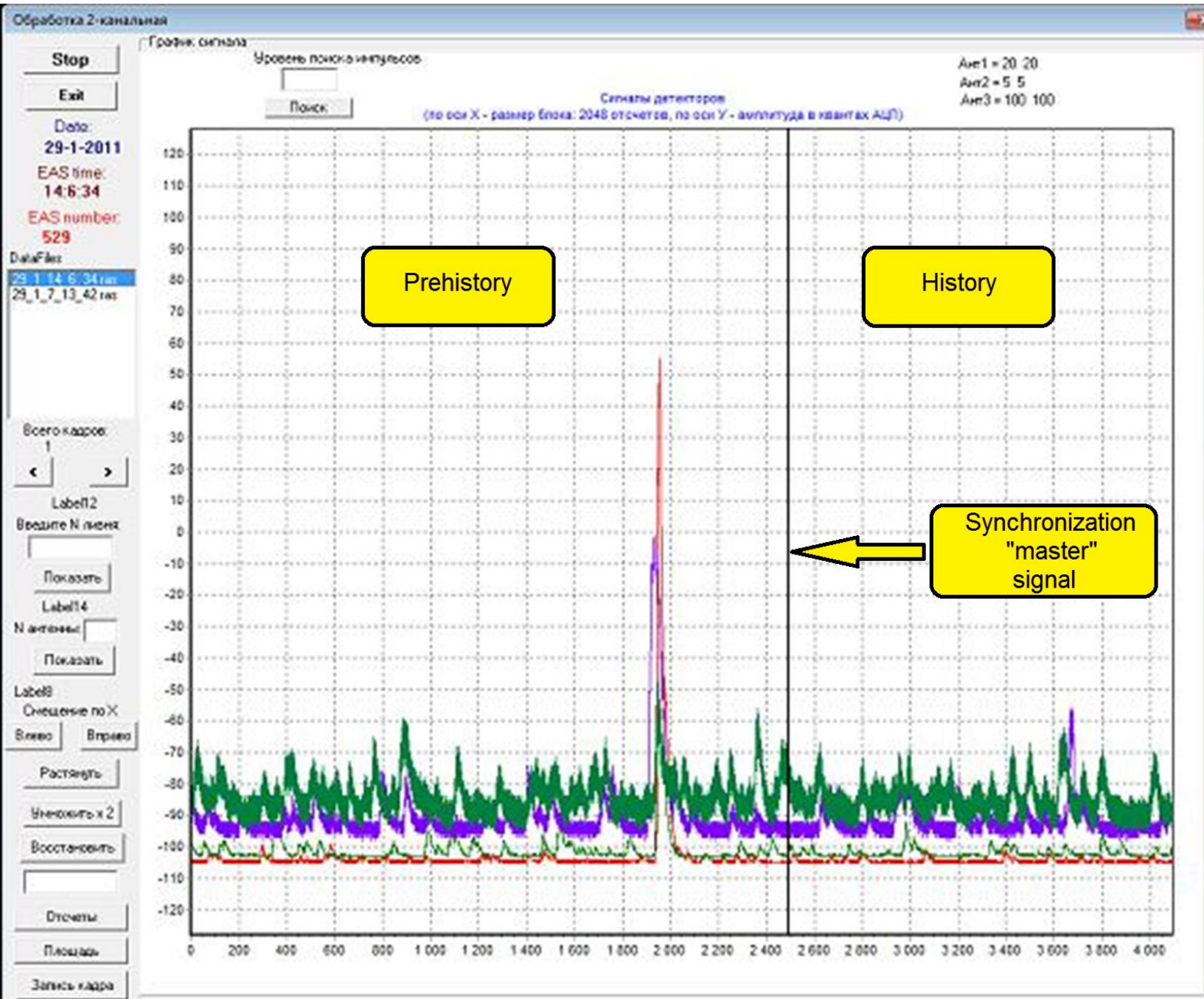
$\nu$  (= 32 МГц) – частота наблюдения

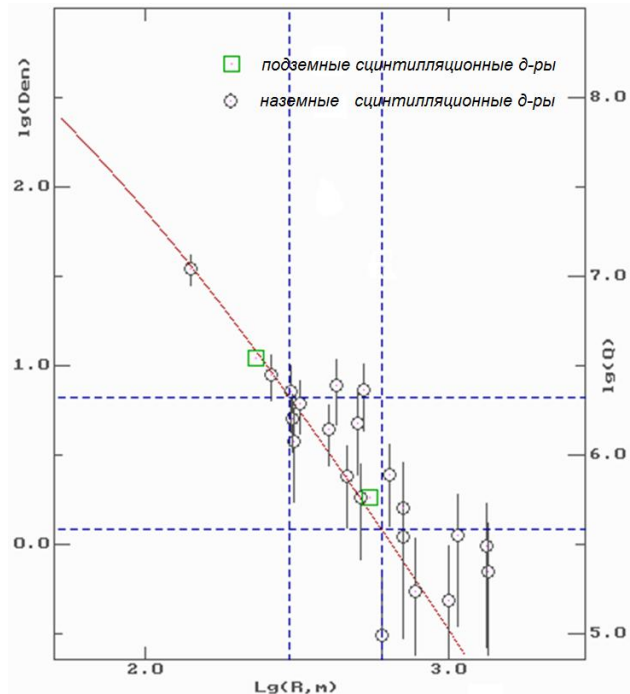
$R_{ADC}$  (= 50 Ом) – внутренний импеданс

$G_{(\theta,\phi,\nu)}$  – усиление антенны

$A_{(ele)}$  – полное усиление антенны

$$\varepsilon_\nu = \frac{\mathbf{E}}{\Delta\nu}$$





N=66030  
 3-2-2011 14:51:6 (Yakutsk)  
 Zen=0.60 Fi=279.8  
 Hi= 1.7 7  
 Lg(S600)=0.09 E0=18.33  
 X= -401 Y= -422  
 Err= 11 21  
 Hi=11.8 13  
 Ra, Dec : 257.5 44.1  
 L2, B2 : 69.3 36.0

**Дата**

**03.02.2011**

**Зенитный угол**

**$\theta = 53$**

**Время**

**14:51:06**

**Расстояние**

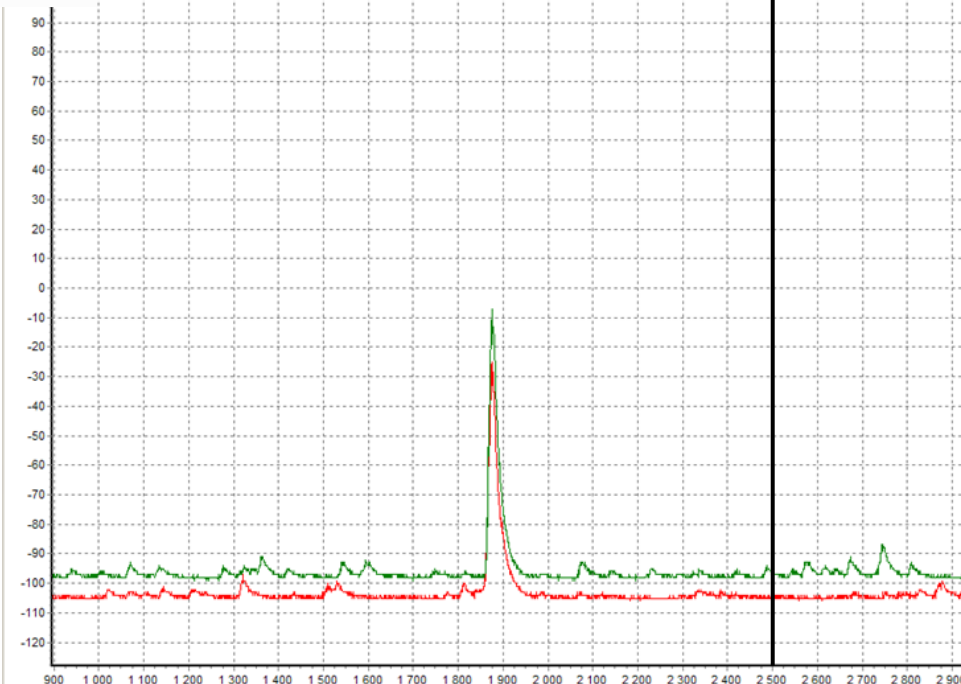
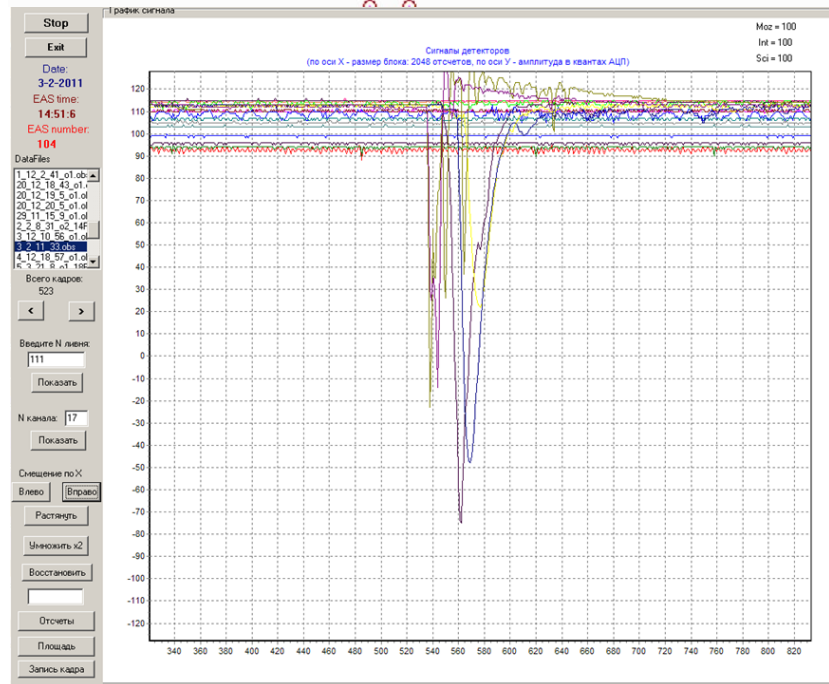
**$R_{rad} = 317$  m**

**Энергия**

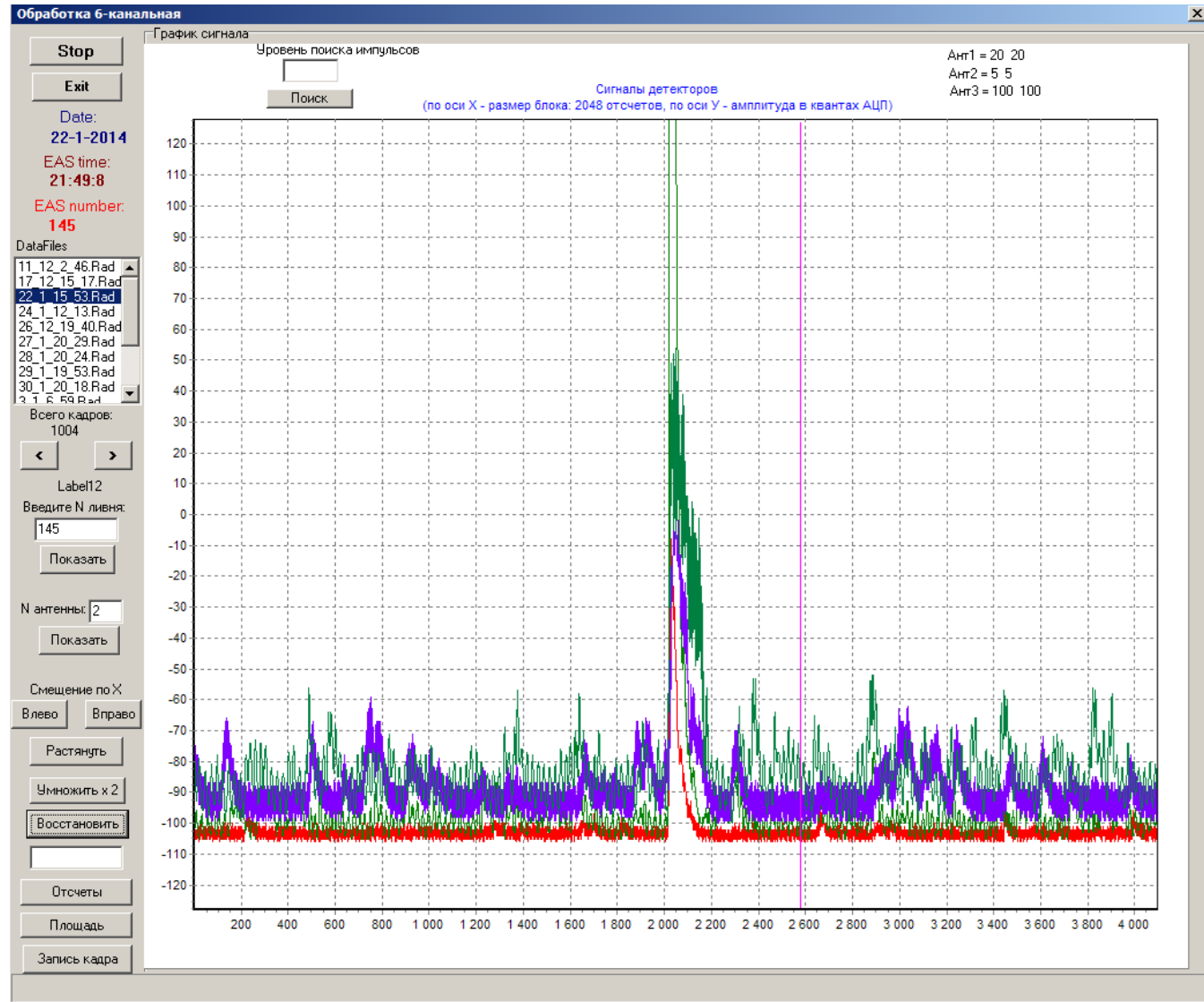
**$E_0 = 2,14 \cdot 10^{18}$  эВ**

Уровень поиска импульсов:   
 Стоп  
 Ант1 = 20 20  
 Ант2 = 5 5  
 Ант3 = 100 100

Сигналы детекторов  
 (по оси X - размер блока: 2048 отсчетов, по оси Y - амплитуда в квантах АЦП)



# ШАЛ с энергией выше $10^{19}$ эВ



Дата:

22. 01. 2014

Время:

21:49:08

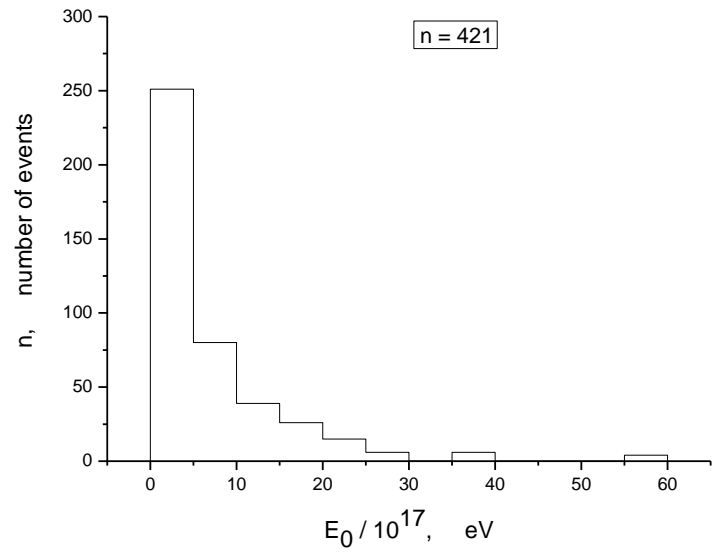
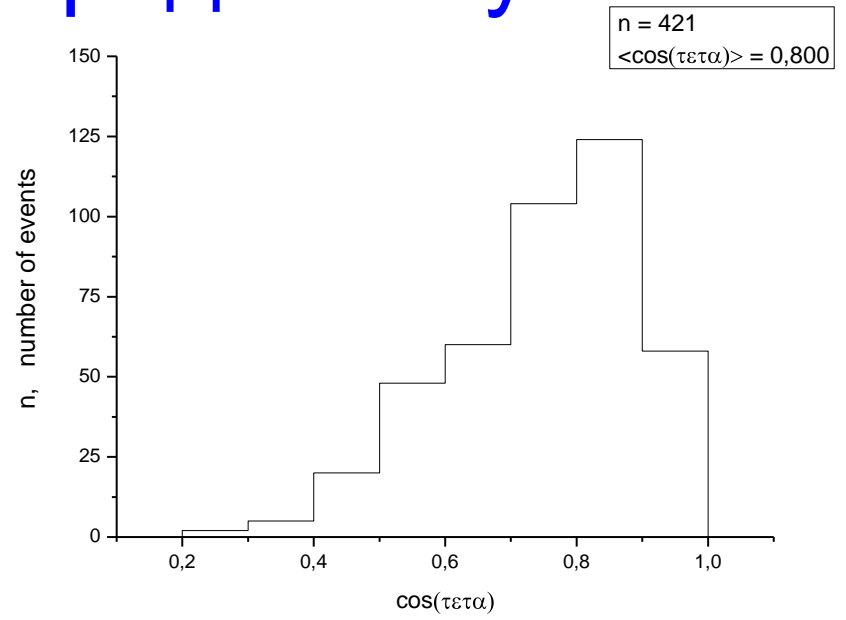
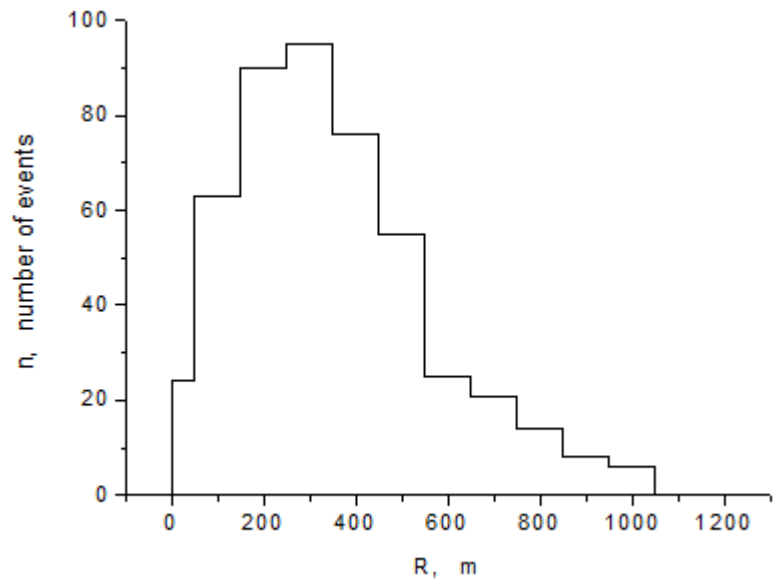
Зенитный угол:

$\theta = 46$

Энергия:

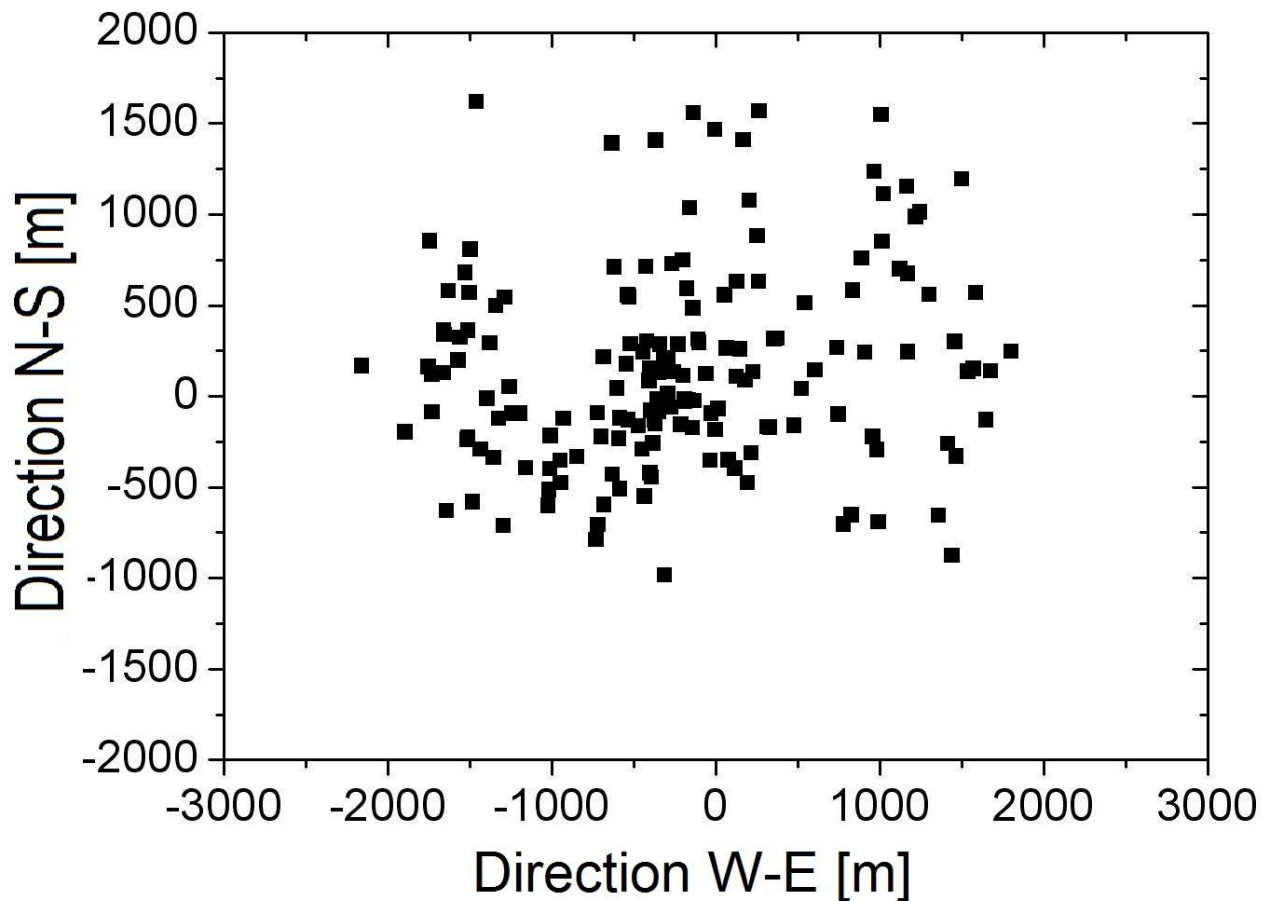
$E_0 = 1,1 \cdot 10^{19}$  эВ

# Анализ событий ШАЛ с радиоизлучением



Так как большая часть сработавших антенн находится в диапазоне 200 – 500 м, поэтому данные нормировались к  $R_{мед} = 350$  м

# Распределение точек пересечения оси индивидуальных событий ШАЛ с плоскостью установки



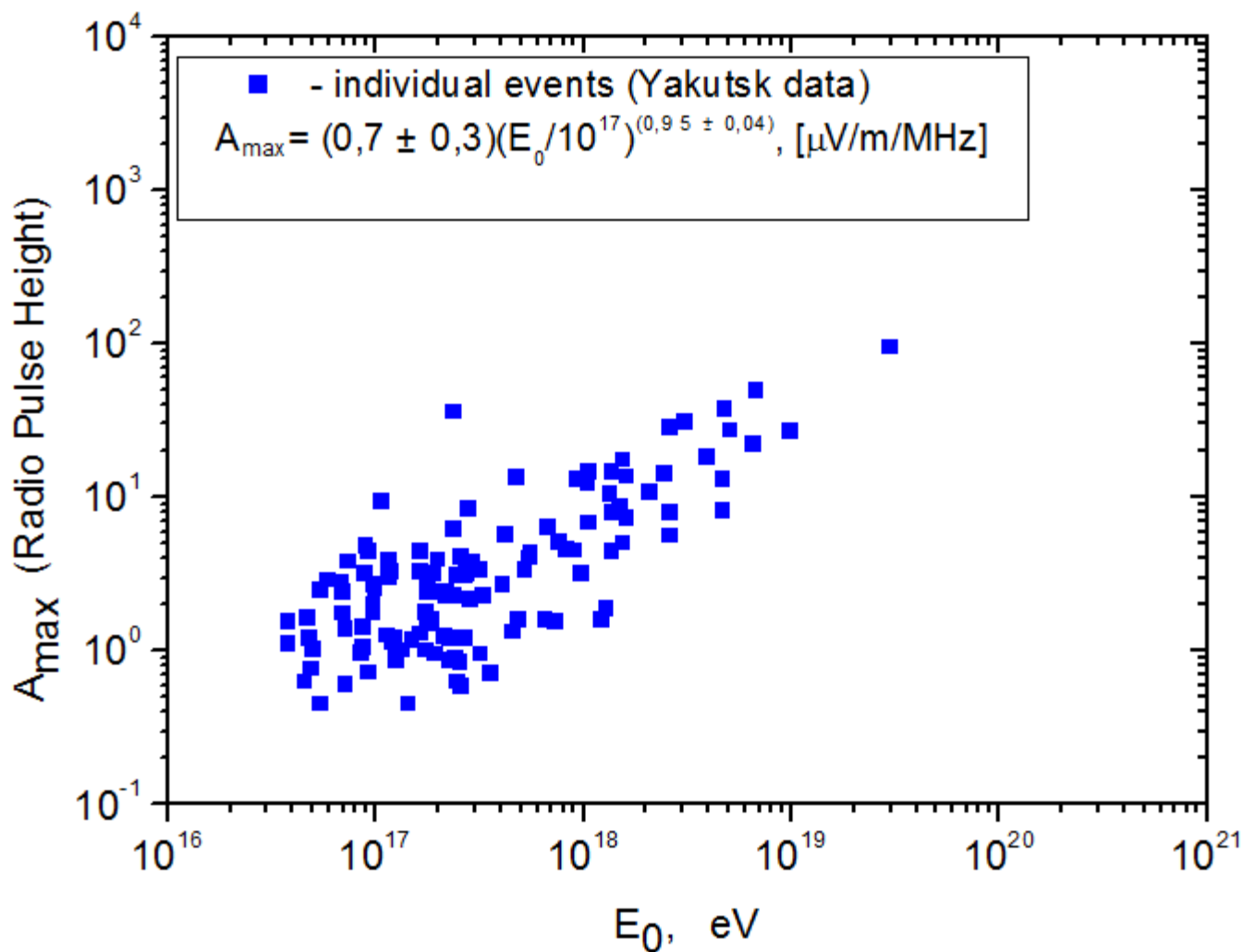
Выборка ливней с  
энергией

$$E > 3 \cdot 10^{16} \text{ эВ}$$

Зенитный угол

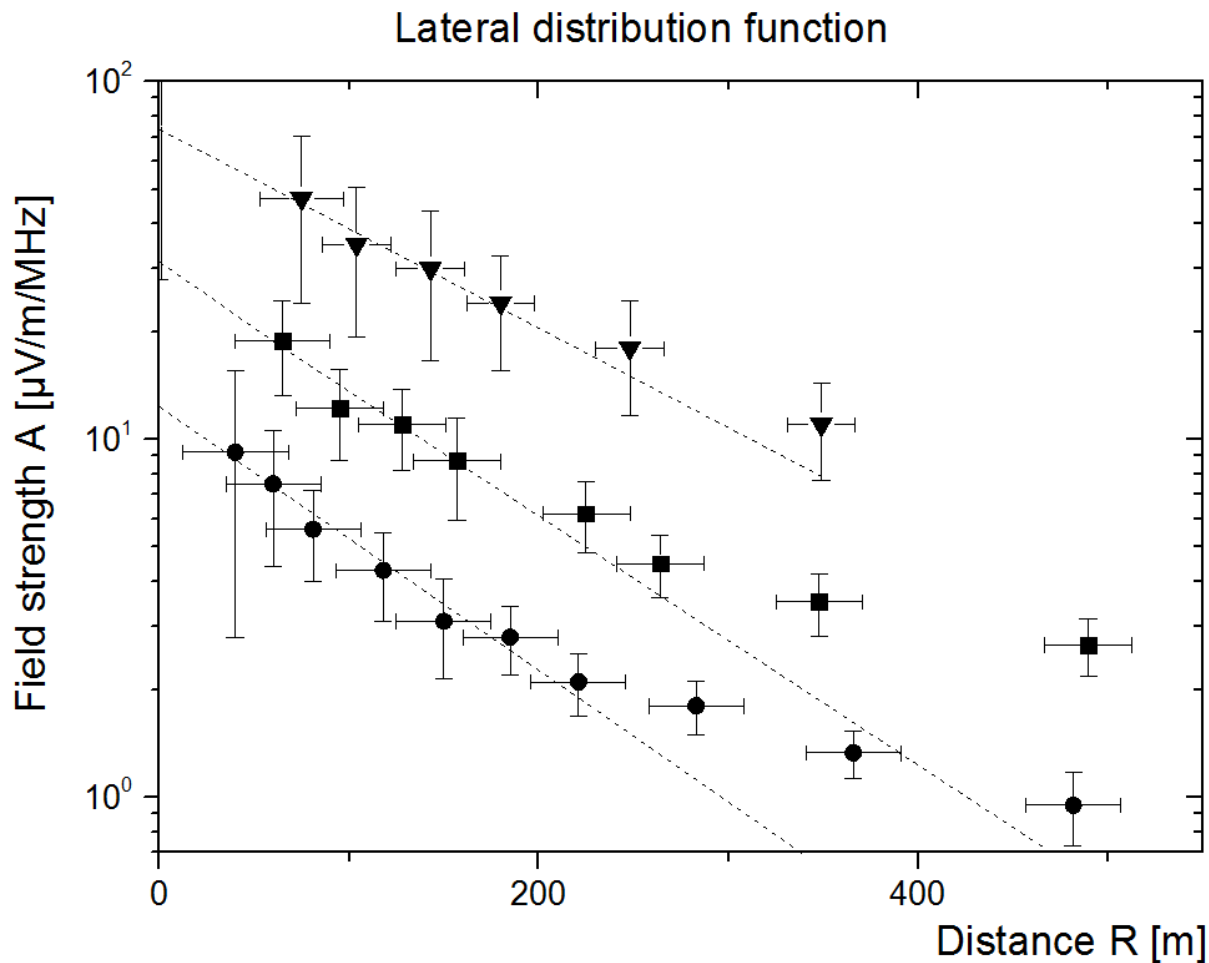
$$\theta \leq 70$$

# Корреляция амплитуды импульса с энергией индивидуальных ливней определенной по черенковским данным



# Функция пространственного распределения

ФПР радио излучения ШАЛ для  
трех энергий:



$1.32 \cdot 10^{18}$  эВ

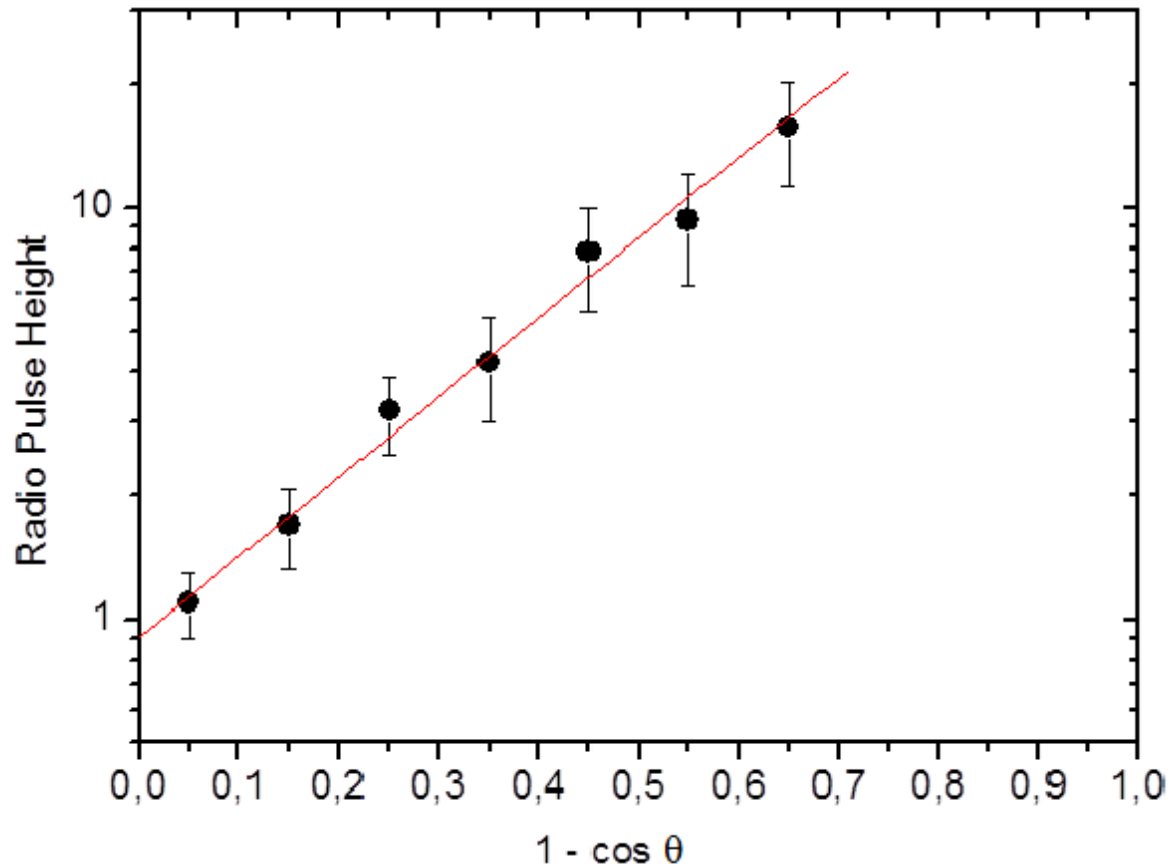
$4.38 \cdot 10^{17}$  эВ

$1.73 \cdot 10^{17}$  эВ

$$A(R) = \varepsilon \cdot \exp(-R/R_0)$$

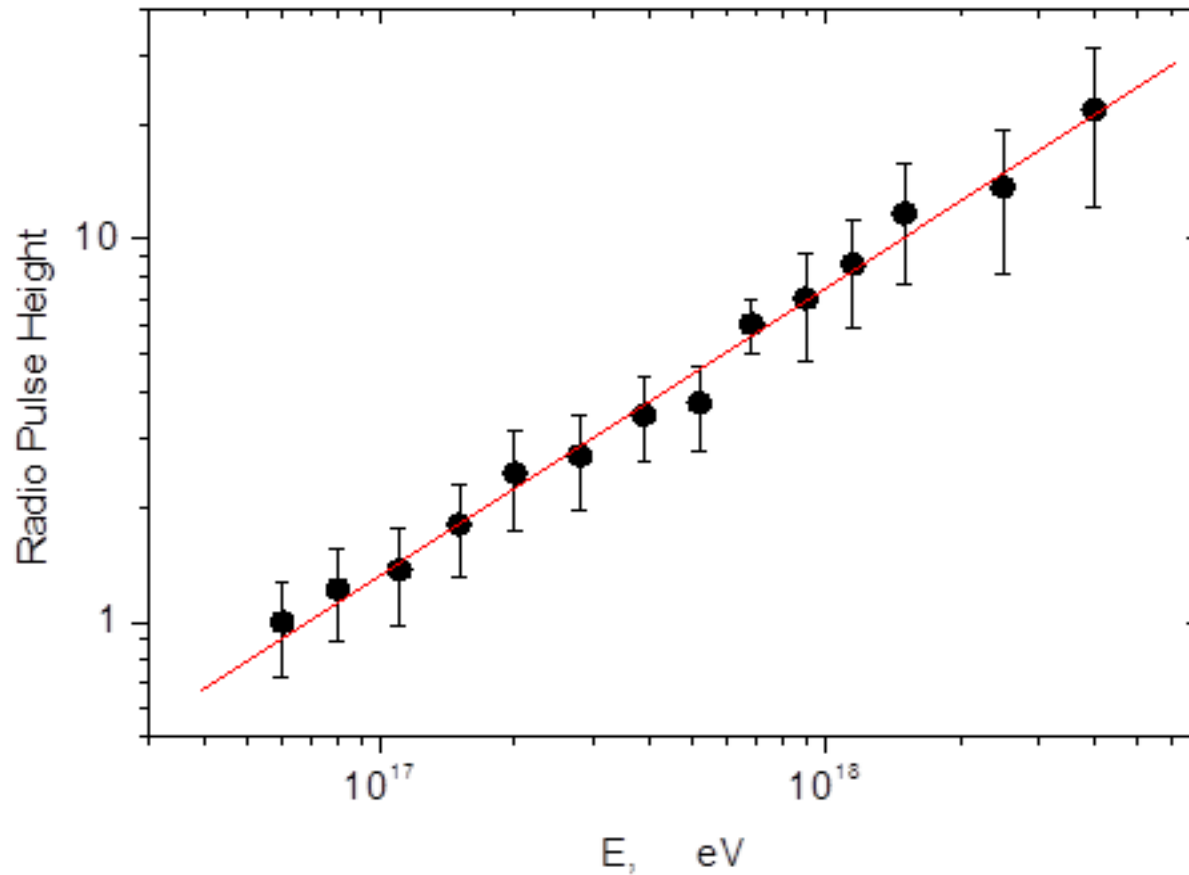


# Зависимость амплитуды радиоимпульса от зенитного угла



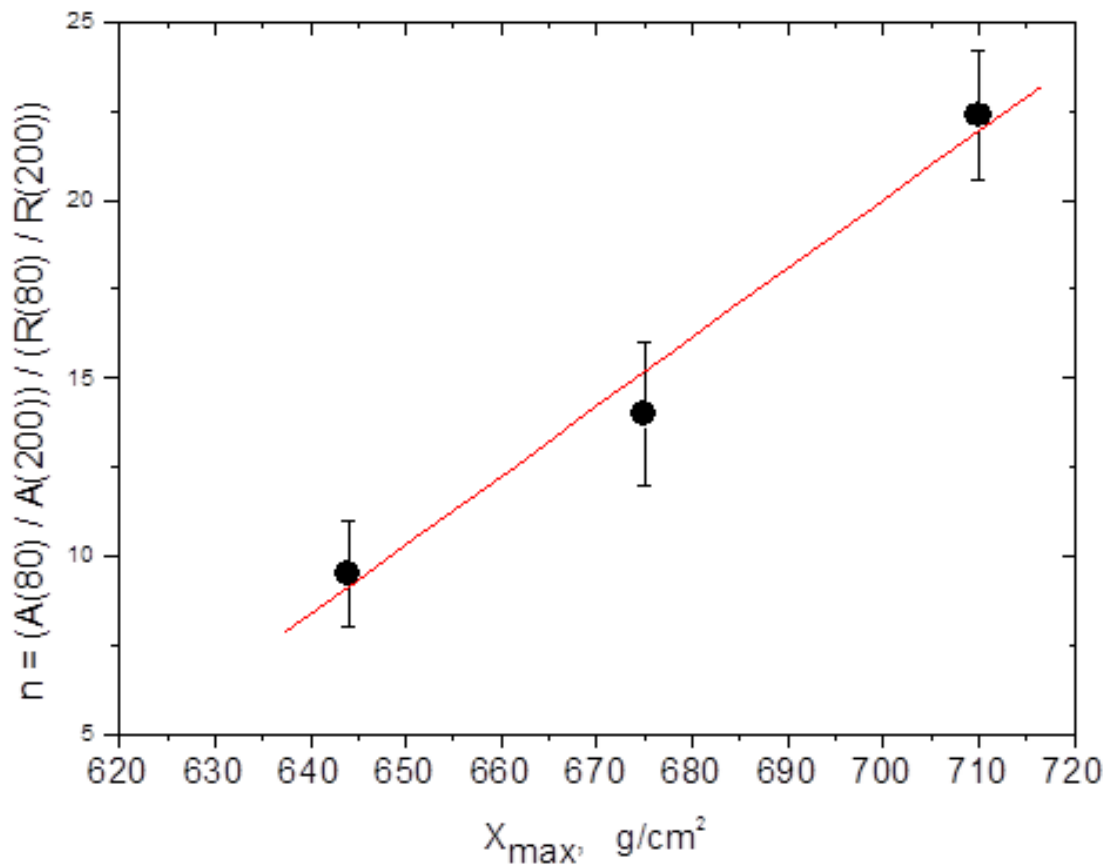
$$\varepsilon(\theta) = (0.81 \pm 0.25)(1 - \cos \theta)^{1.16 \pm 0.05}$$

# Зависимость амплитуды радиоимпульса от энергии ливня



$$\varepsilon(E) = (1.3 \pm 0.3)(E_0/10^{17} eV)^{0.99 \pm 0.04}$$

# Корреляция между наклоном ФПР радиоизлучения и глубиной развития максимума ШАЛ



Глубина максимума развития определялась из измерений черенковского света ШАЛ

Наклоны были определены, используя амплитуды сигналов, взятых из средних ФПР на расстоянии 80-200 м от оси ливня для 3-х энергий:

$1.73 \cdot 10^{17}$  eV

$4.38 \cdot 10^{17}$  eV

$1.32 \cdot 10^{18}$  eV

# Заключение

Измерениями, проведенными на Якутской установке, показано:

- существует корреляция между измеренной амплитудой радиосигнала и энергией ливня, полученной по измерениям основных компонент ШАЛ на уровне наблюдения;

$$\varepsilon(E, \theta, R) = (15 \pm 1)(1 - \cos \theta)^{1.16 \pm 0.05} \exp\left(-\frac{R}{350 \pm 25.41}\right) \cdot \left(\frac{E_p}{10^{17}}\right)^{0.99 \pm 0.04}$$

- форма пространственного распределения радиосигнала коррелирует с глубиной максимума развития ШАЛ  $X_{\max}$ .
- В дальнейшем планируется увеличение количества антенн на площади 1 км<sup>2</sup>.

**Спасибо за внимание!**