

Бонвич Елена Алексеевна

Лаборатория теоретических и экспериментальных исследований
взаимодействия и переноса излучений в различных средах

**Научный отчёт за 5 лет
2013-2017 гг**



<http://sphere.sinp.msu.ru/>

Тема работы

Теоретическое и экспериментальное
исследование переноса излучения в
земных и астрофизических средах.

Проект СФЕРА

направлен на изучение космических лучей
с $E > 3 \cdot 10^{15}$ эВ
методом регистрации
отраженного черенковского света ШАЛ.

Экспериментальная установка СФЕРА-2
работает в диапазоне энергий
 10^{16} эВ $< E_0 < 10^{18}$ эВ.

Основные направления работы

- I. Моделирование эксперимента
- II. Обработка экспериментальных данных
- III. Развитие методов анализа данных

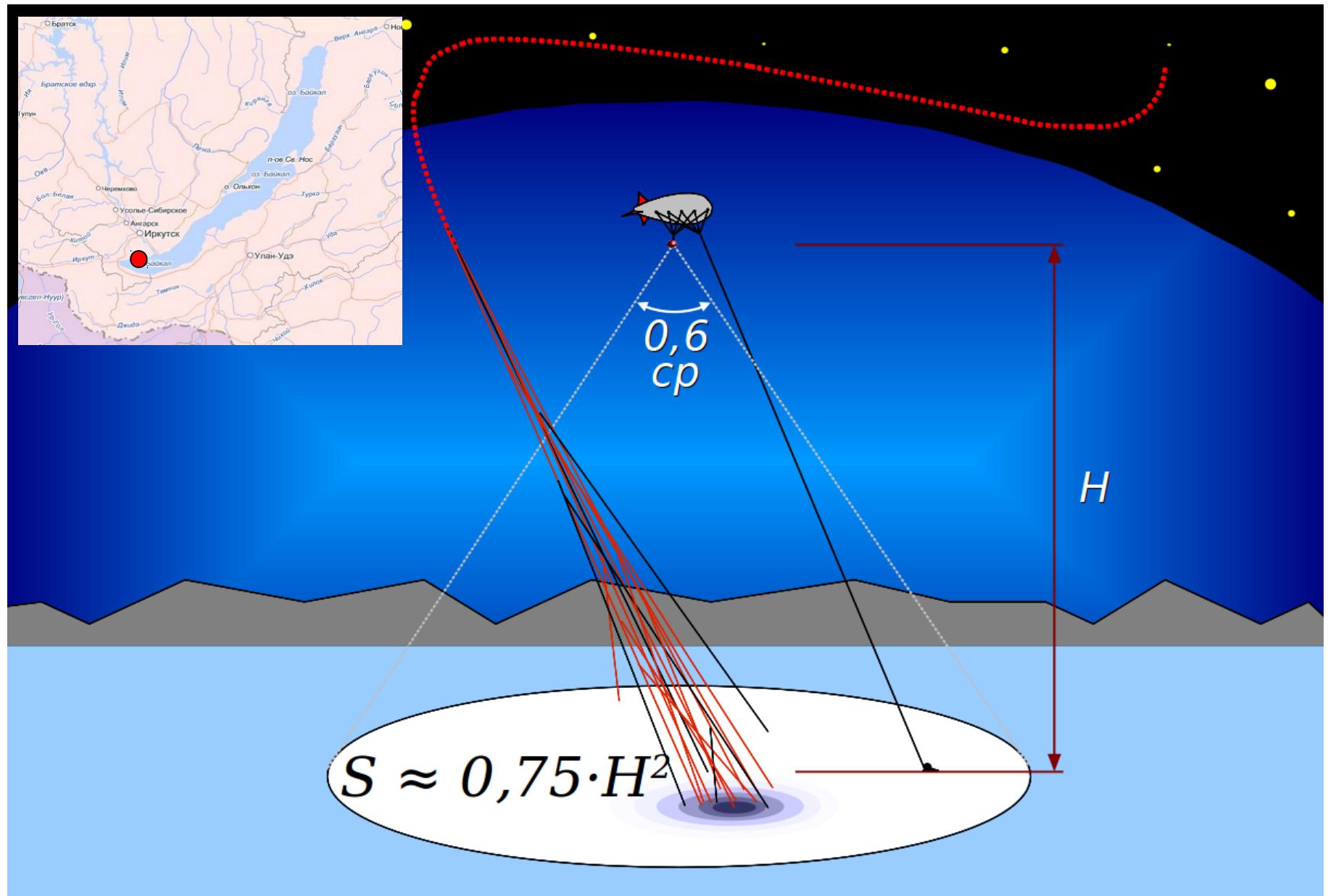
I. Моделирование эксперимента

Моделирование эксперимента

- I. Реконструкция спектра всех ядер ПКЛ с детальным исследованием систематических и методических погрешностей.
- II. Разделение групп ядер ПКЛ.

Решение этих задач требует моделирования.

Схема эксперимента на озере Байкал



Моделируемые процессы

1. Пространственное и временное развитие ШАЛ в атмосфере.
2. Отражение ЧС от снега и оптическая система детектора.
3. Преобразование света в электрические импульсы.
4. Работа триггерной системы.

1. Моделирование пространственно-временной структуры ЧС ШАЛ

Полное Монте-Карло моделирование

A) CORSIKA 6.500 code

B) QGSJET-I (version 01c) - модель для
высокоэнергетических адронных взаимодействий

C) GHEISHA 2002d — модель для
низкоэнергетических адронных взаимодействий

Параметры моделирования

- $H = 455$ м над у.м. - высота поверхности озера Байкал
- $K_{\text{mirror}} = 0.9$ — коэффициент отражения зеркала установки
- $\eta(\lambda)$ — квантовая эффективность ФЭУ-83-4
- $E_e = 19$ МэВ, энергетический порог электронов

Результат моделирования одного ливня

Фотоны на уровне озера

Трехмерный массив фотонов на уровне
поверхности озера Байкал

$$F(nx, ny, nt) = F(480, 480, 102)$$

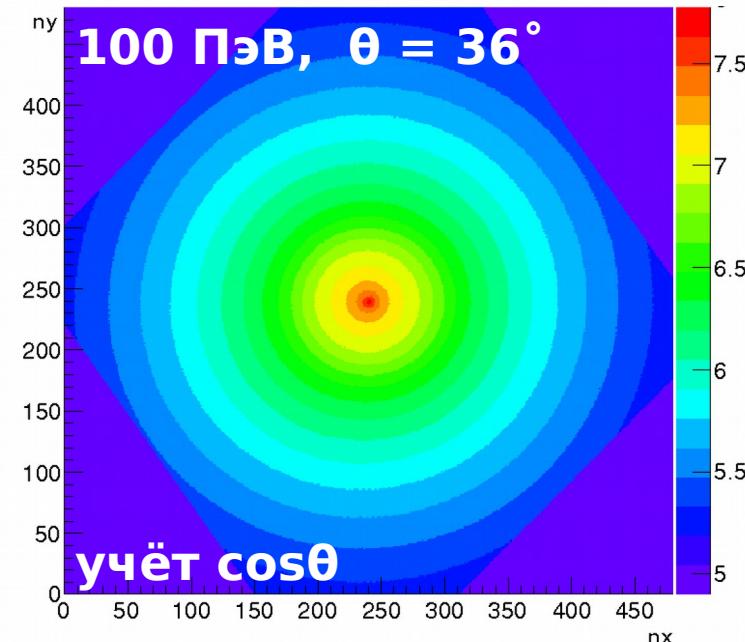
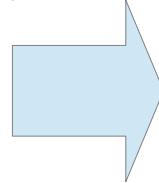
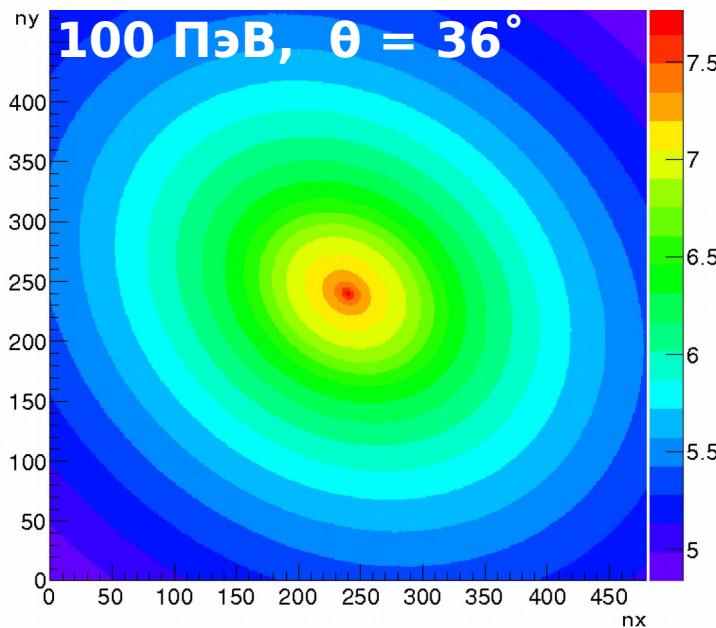
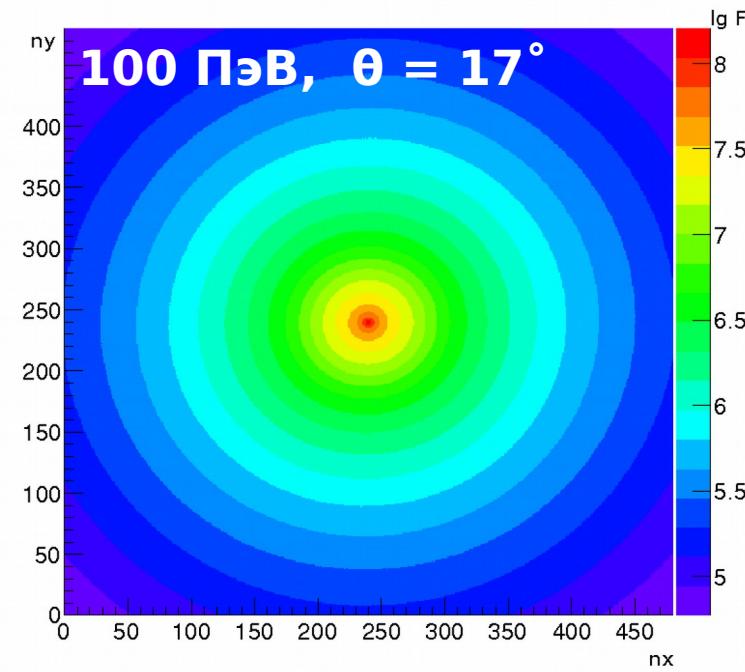
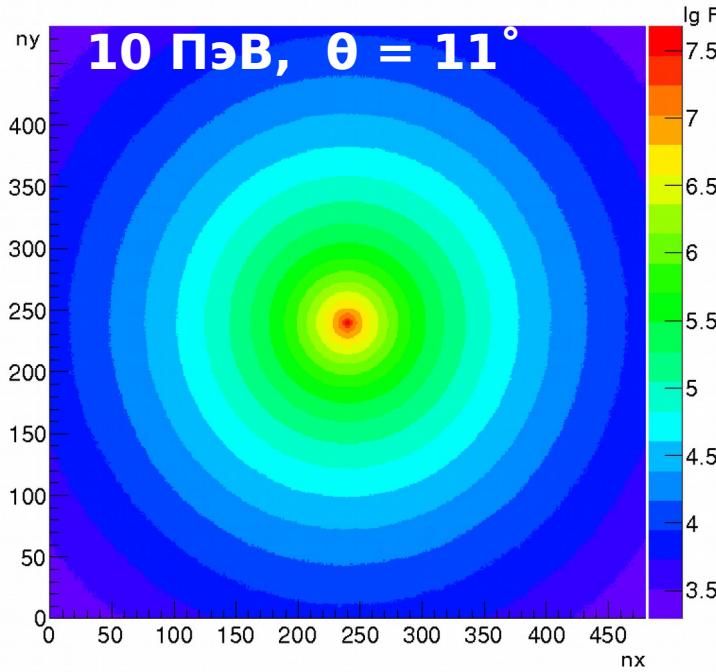
$$dx = dy = 2.5 \text{ м}, dt = 5 \text{ нс}$$

Набор ядер $A = \{\text{p, He, N, Fe}\}$

Набор энергий $E_0 = \{10, 30, 100\} \text{ эВ}$

Набор углов $\theta = \{00-20, 20-40\} \text{ град}$

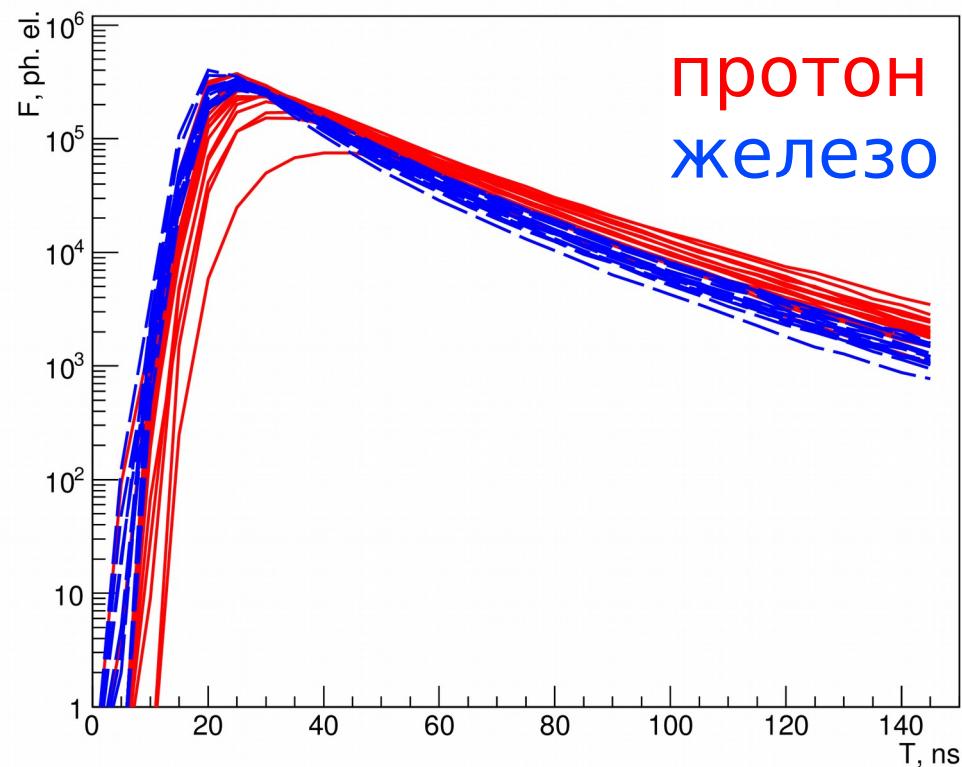
ШАЛ от протонов



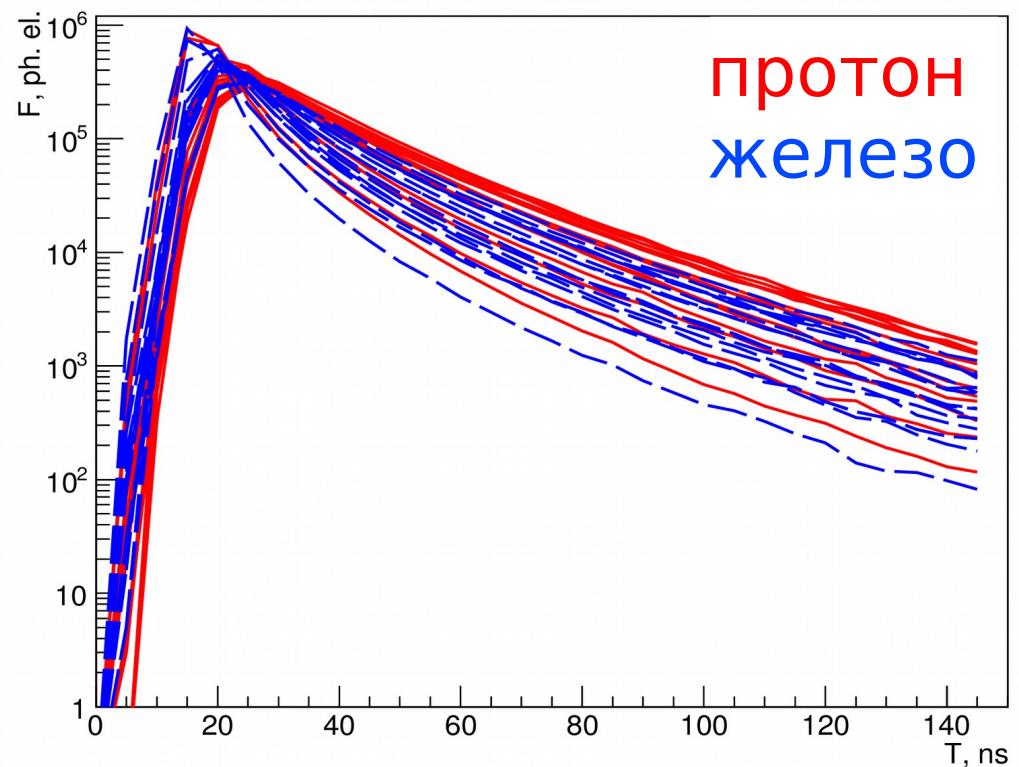
Форма импульса ливня

$E = 100$ ПэВ

$R = 250$ м от оси ливня



$0 < \theta < 20^\circ$



$20 < \theta < 40^\circ$

2. Моделирование отражения от снега и оптической системы детектора

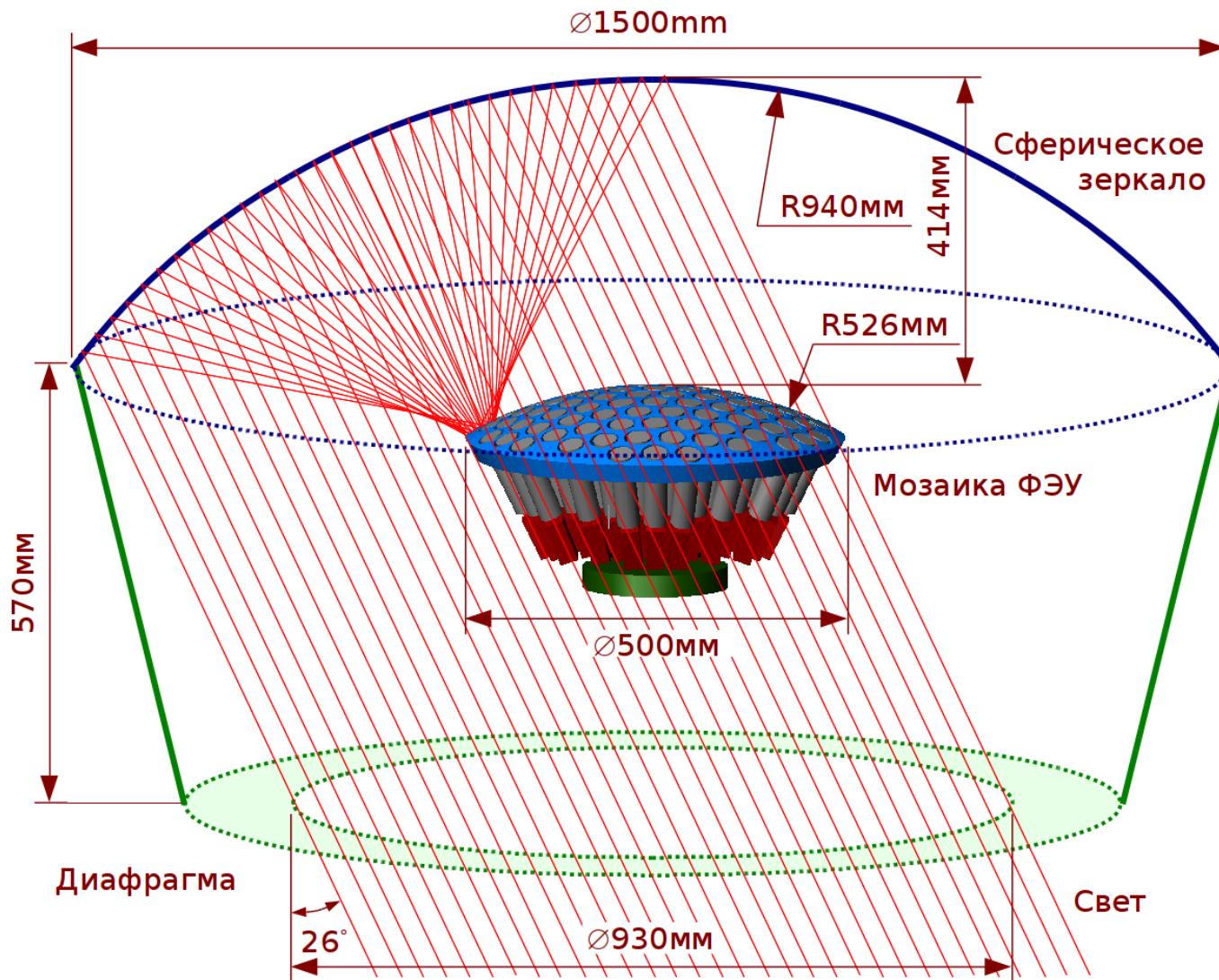
Фотоны на уровне озера → Фотоэлектроны

Отражение от снега — диффузное,
по закону Ламберта:

$$I(\theta) = I_o \cdot \cos \theta$$

$K_{\text{snow}} = 0.9$ — коэффициент отражения от
снега

Оптическая схема установки «СФЕРА-2»



Моделирование оптической системы

- GEANT4
- $K_{\text{mirror}} = 0.9$ — коэффициент отражения от зеркала
- Набор высот установки:
 $H = \{400, 500, 580, 700, 900\}$ м
- Набор осей: 100 для каждого ливня внутри квадрата $1.5H \times 1.5H$

Результат моделирования оптической системы

Фотоны (Фотоэлектроны)

Набор фотонов, достигших ФЭУ мозаики.

Для каждого фотона записываются:

- Номер ФЭУ
- Время прихода
- Расстояние до центра фотокатода
- Угол падения на фотокатод

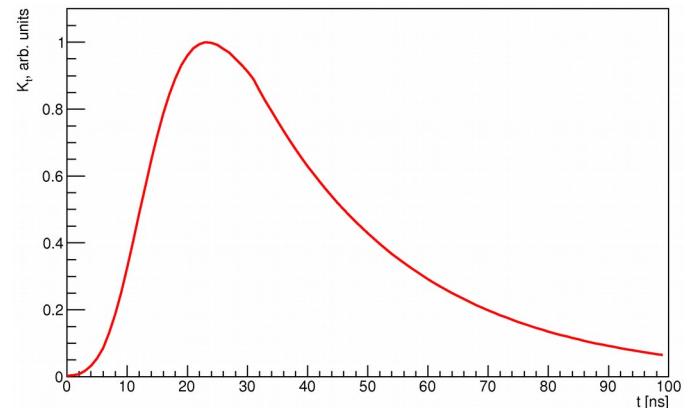
3. Моделирование работы электроники

Фотоэлектроны

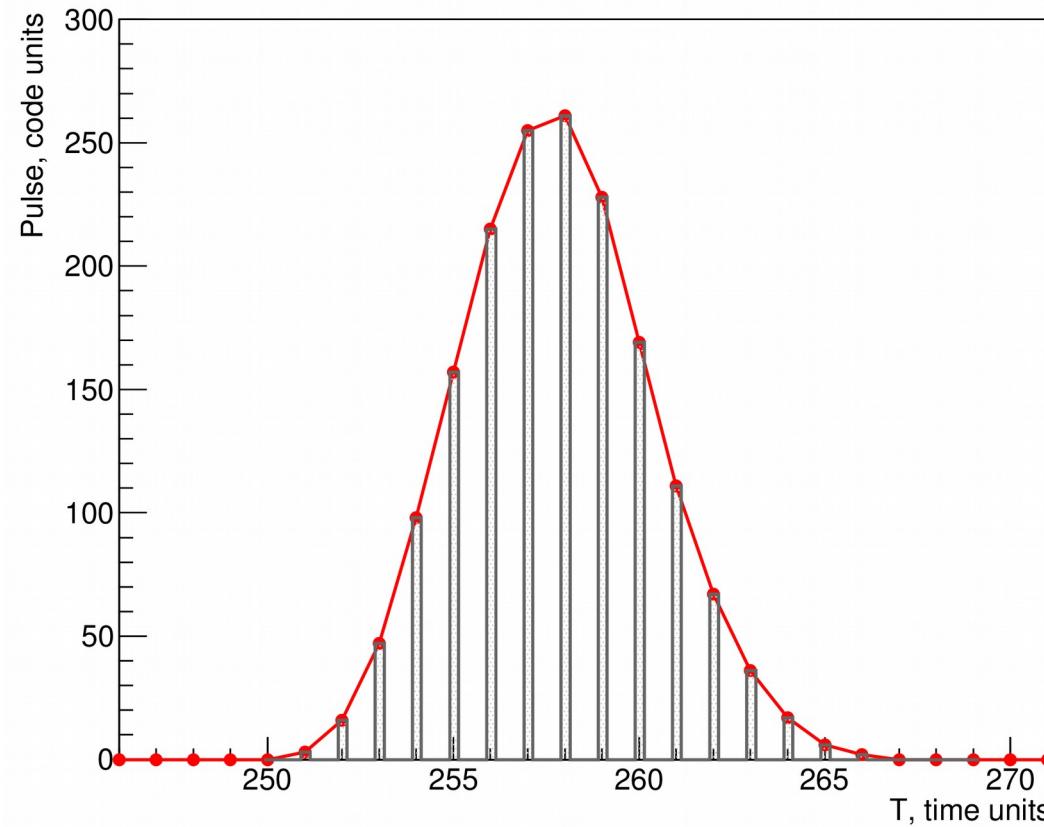


Событие (Единицы кода)

- $dt = 1 \text{ нс}$ - квант временного расчёта
- функция отклика ФЭУ
- $F_{abc} = 1.0$ — коэффициент абсолютной калибровки



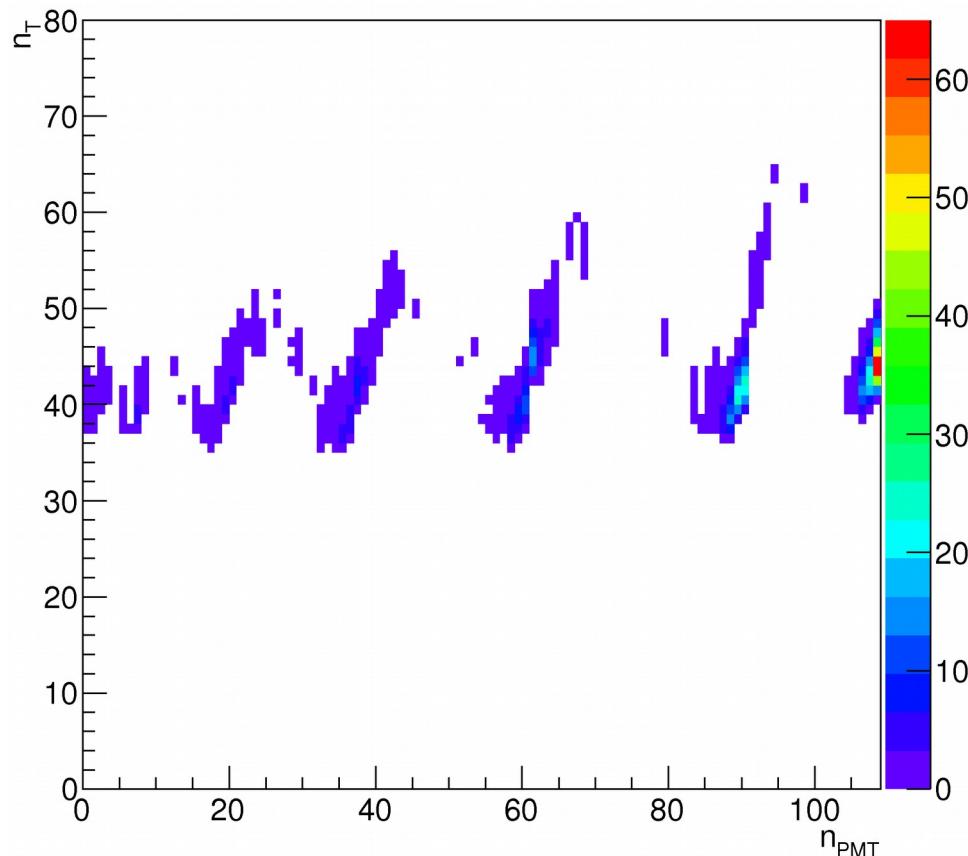
Оцифровка сигнала



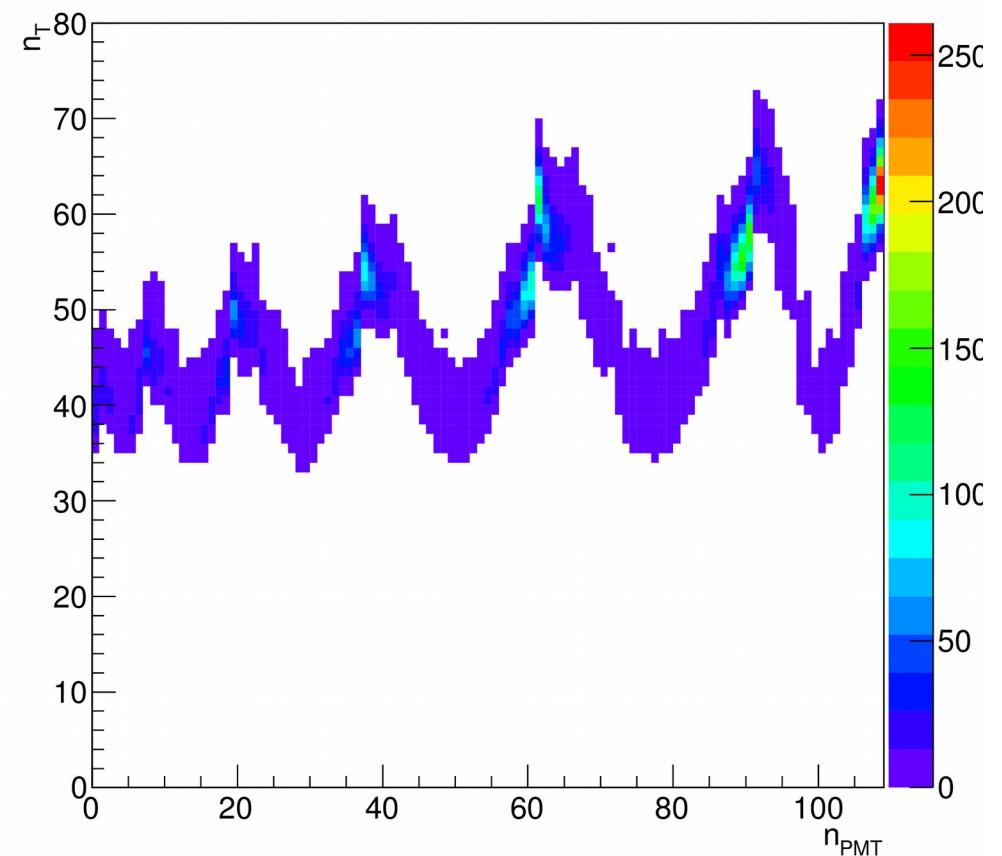
$dt_{\text{АЦП}} = 12.5 \text{ нс} — \text{квант оцифровки АЦП}$

Результат моделирования работы электроники

Событие (Единицы кода)



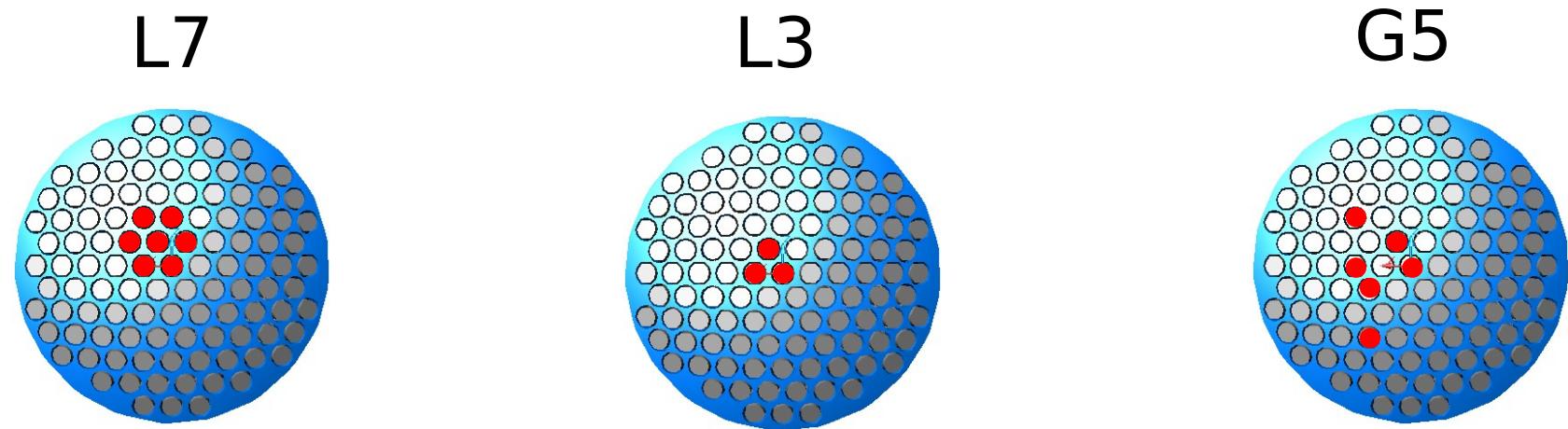
10 ПэВ, $\theta = 11^\circ$



100 ПэВ, $\theta = 17^\circ$

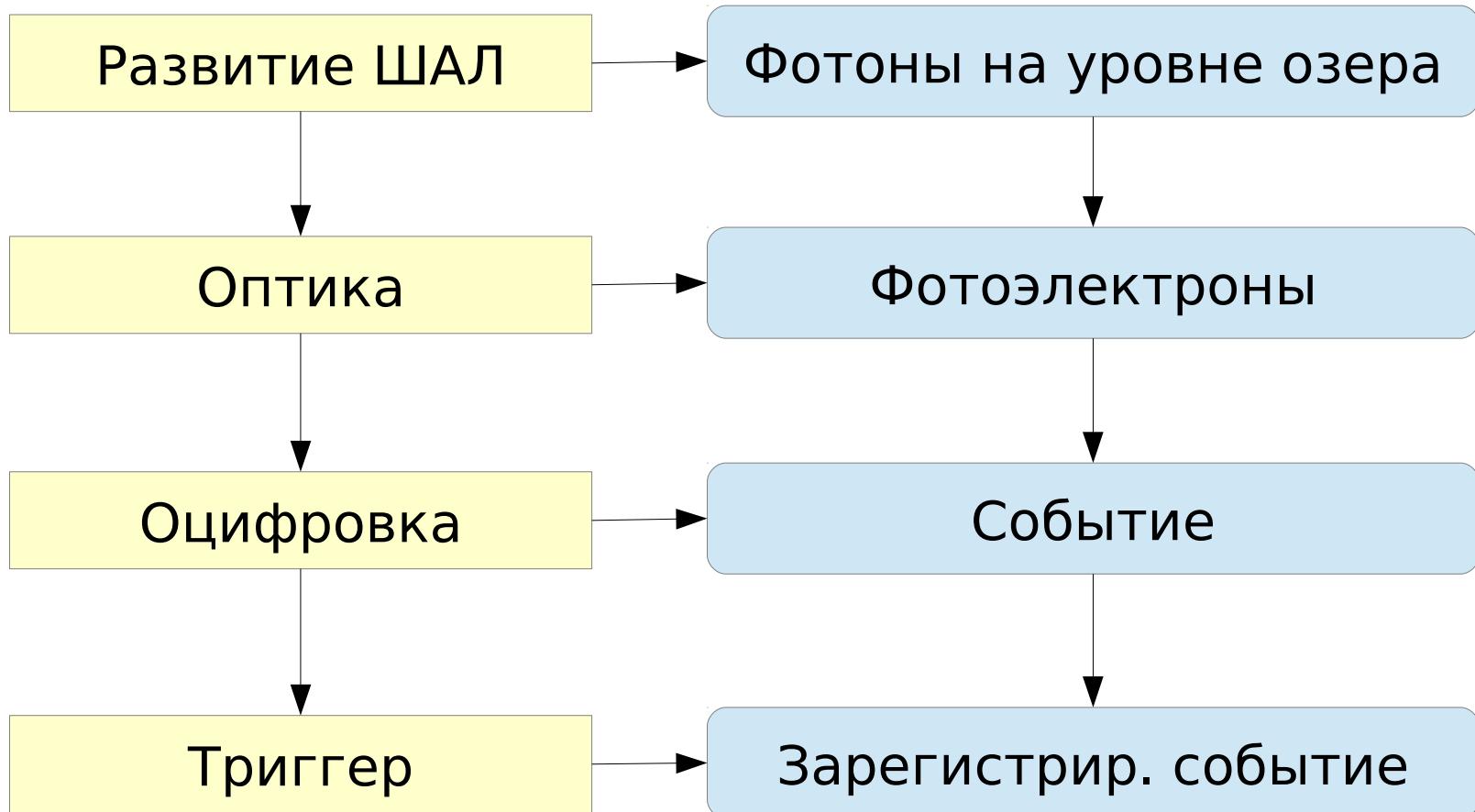
4. Моделирование триггера

Триггерное условие: L3, G5



Учет шума и порогов — из
экспериментальных данных

Моделирование



Дальнейшие расчёты

Составная модельная ФПР

Геометрический фактор



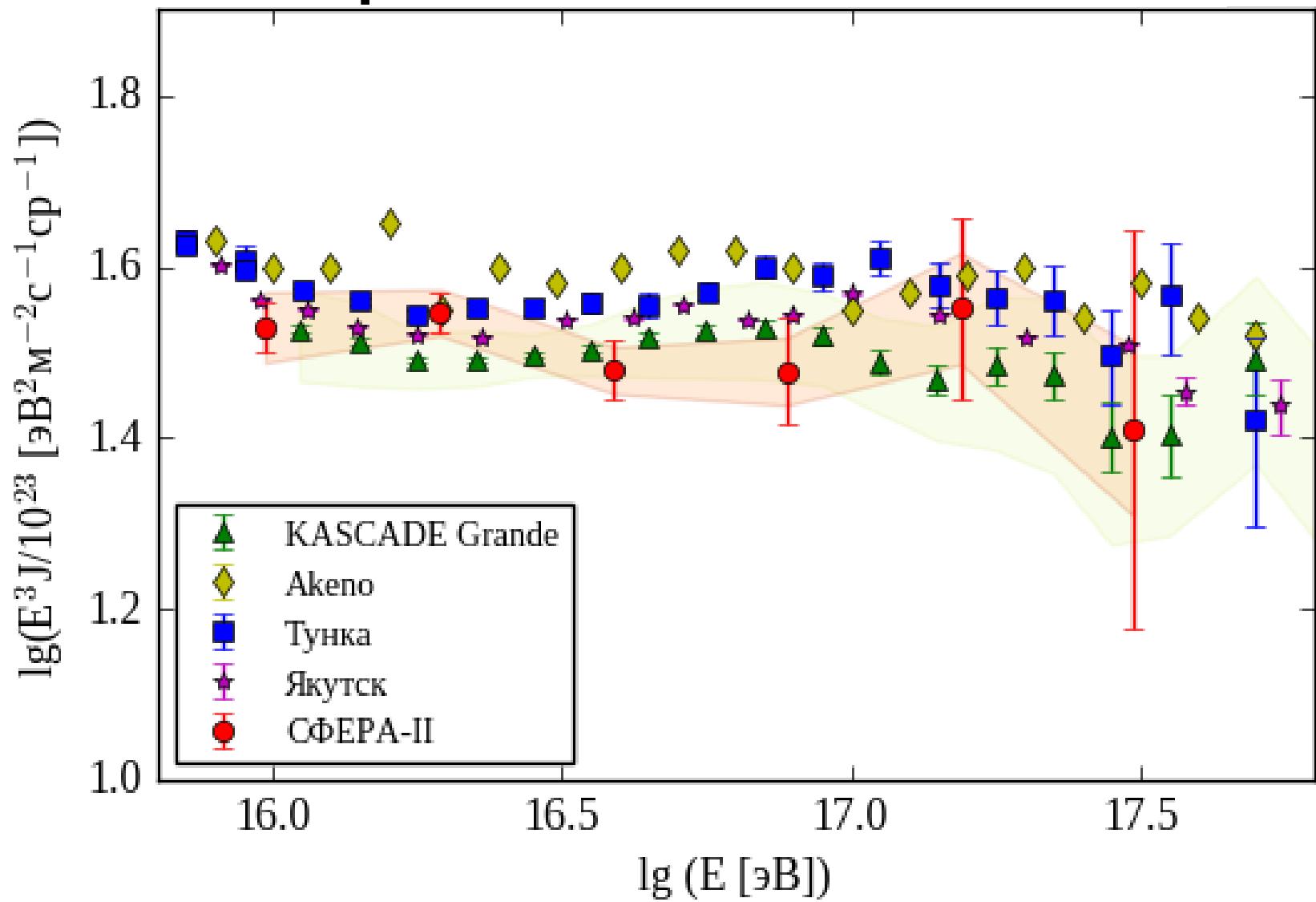
Спектр

Параметр наклона ФПР η



Состав

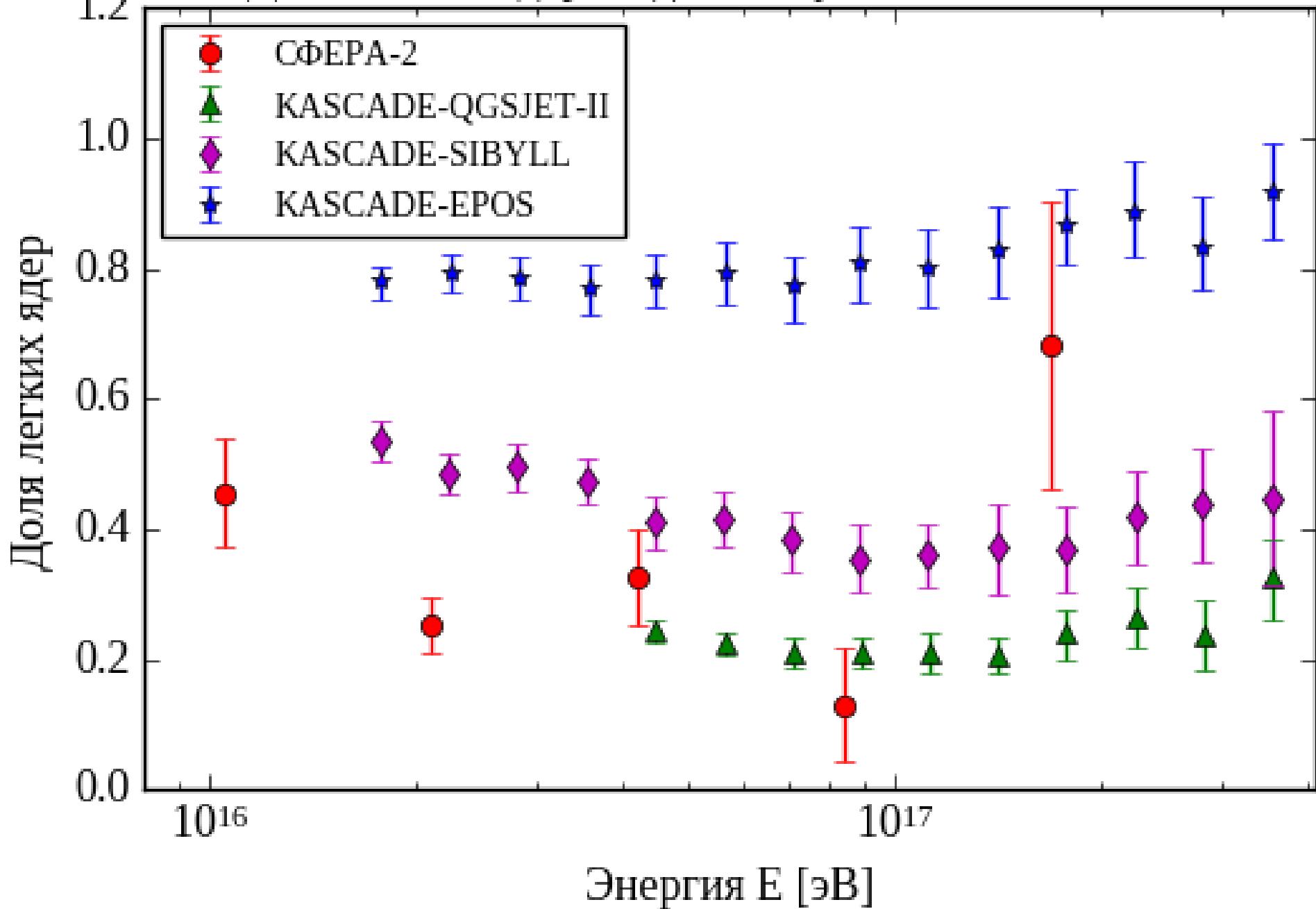
Спектр ПКЛ: 2011-2013



Дифференциальный энергетический спектр по данным 2011–2013 годов [2]

[2] Регистрация отражённого черенковского света ШАЛ в эксперименте <<СФЕРА>> как метод изучения космических лучей сверхвысоких энергий / Д. В. Чернов, Р. А. Антонов, Т. В. Аулова и др. // **Физика элементарных частиц и атомного ядра.** — 2015. — Т. 46, № 1. — С. 115-166.

Доля легких ядер по данным установки СФЕРА-2



Моделирование

Проведено полное Монте-Карло
моделирование ЧС ШАЛ для уровня
поверхности озера Байкал.

Проведено моделирование работы
оптической, электронной и триггерной
систем установки СФЕРА-2.

Результаты моделирования использованы
для получения энергетического спектра и
выделения доли легкой компоненты в
массовом составе ПКЛ.

Spatial and temporal structure of EAS reflected Cherenkov light signal

R.A. Antonov^a, E.A. Bonvech^a, D.V. Chernov^a, T.A. Dzhatdoev^{a,*}, V.I. Galkin^{b,a}, D.A. Podgrudkov^{b,a},
T.M. Roganova^a

^a*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education, M.V. Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), 1(2), Leninskie gory, GSP-1, 119991 Moscow, Russia*

^b*Federal State Budget Educational Institution of Higher Education, M.V. Lomonosov Moscow State University, Department of Physics, 1(2), Leninskie gory, GSP-1, 119991 Moscow, Russia*

Abstract

A compact device lifted over the ground surface might be used to observe optical radiation of extensive air showers (EAS). Here we consider spatial and temporal characteristics of Vavilov-Cherenkov radiation (“Cherenkov light”, CL) reflected from the snow surface of Lake Baikal, as registered by the SPHERE-2 detector. We perform detailed full direct Monte Carlo simulations of EAS development and present a dedicated highly modular code intended for detector response simulations. Detector response properties are illustrated by example of several model EAS events. The instrumental acceptance of the SPHERE-2 detector was calculated for a range of observation conditions. We introduce the concept of “composite model quantities”, calculated for detector responses averaged over photoelectron count fluctuations, but retaining EAS development fluctuations. The distortions of EAS CL lateral distribution function (LDF) introduced by the SPHERE-2 telescope are understood by comparing composite model LDF with the corresponding function as would be recorded by an ideal detector situated at the ground surface. Finally, we compare the reflected CL method with other experimental techniques and briefly discuss its prospects.

Keywords: primary cosmic rays, extensive air showers, Cherenkov light

2010 MSC: 00-01, 99-00

1. Introduction

detectors of TA [21, 22] TALE [23] and PAO [15]. EAS

π^{\pm} radio emission is also studied in various experiments, such

Direct studies of high-energy cosmic rays (CR) with

II. Обработка экспериментальных данных

Стартовый комплекс СФЕРА-2 в 2013

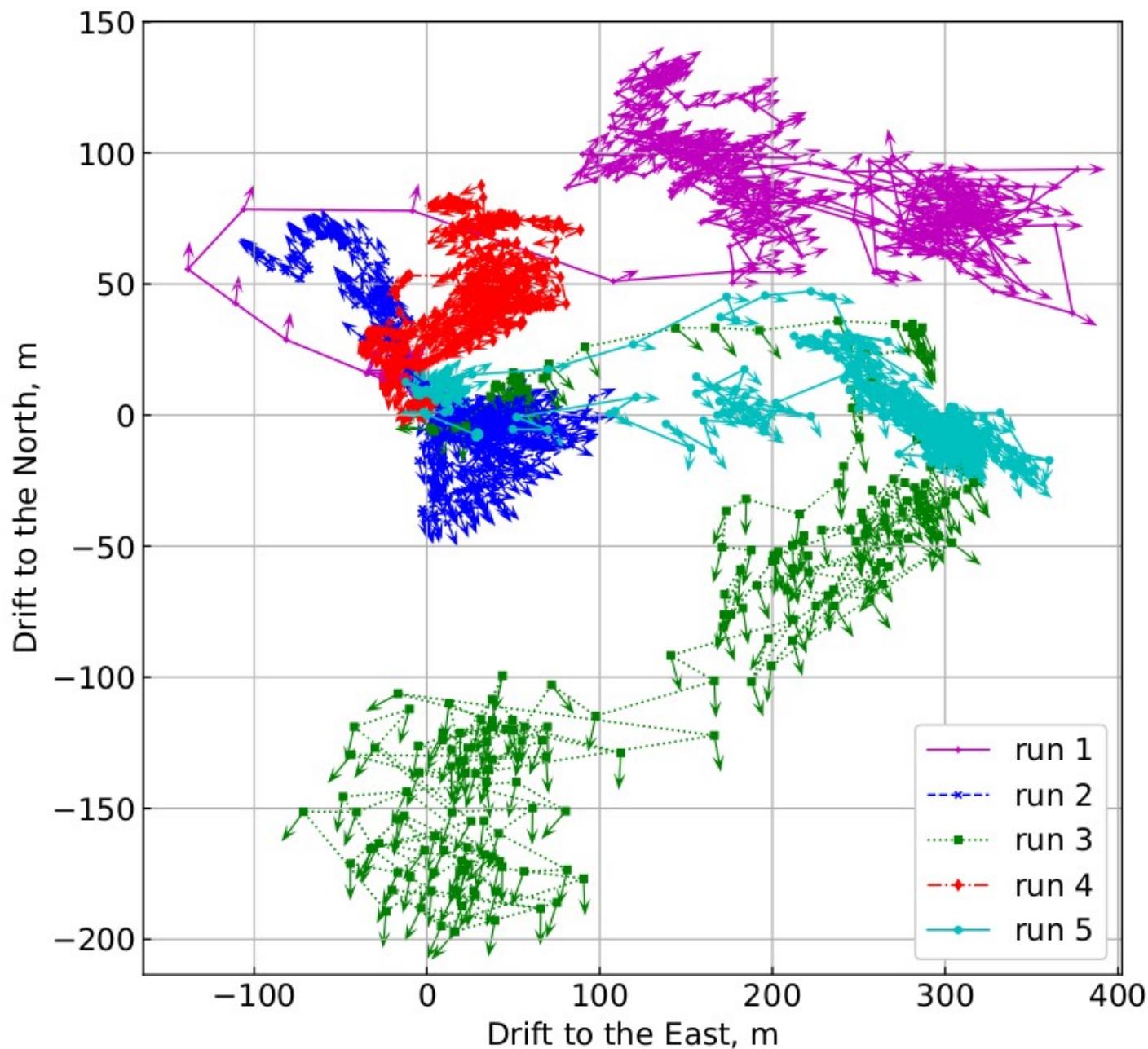
**Ночной
старт**



Аэростат БАПА
250 м³



Телеметрия



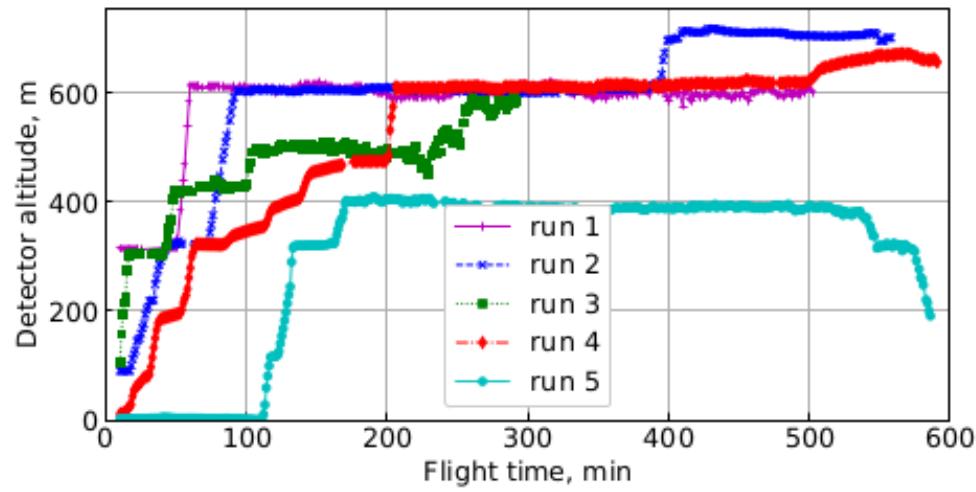


Figure 2: The altitude of the SPHERE-2 detector carried by the BAPA tethered balloon during 2013 experiment runs according to the GPS module data.

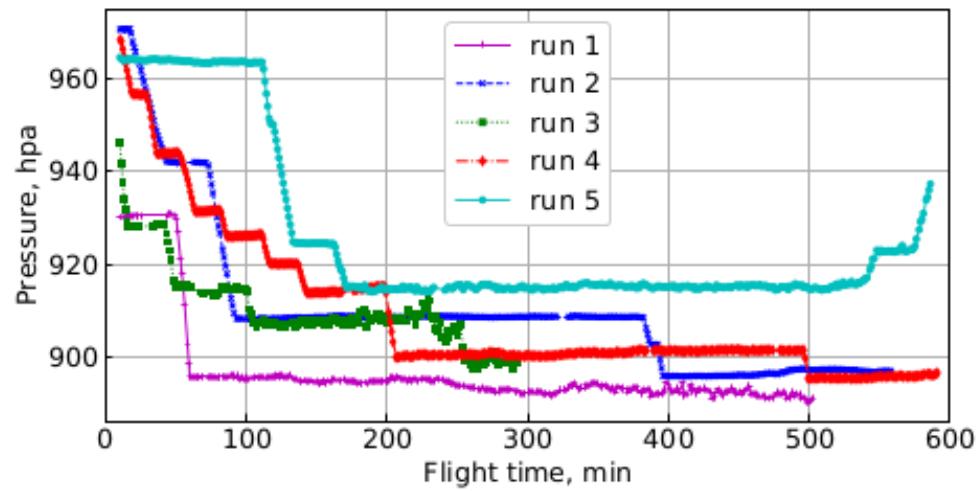


Figure 3: The pressure during 2013 runs according to the barometer sensor data.

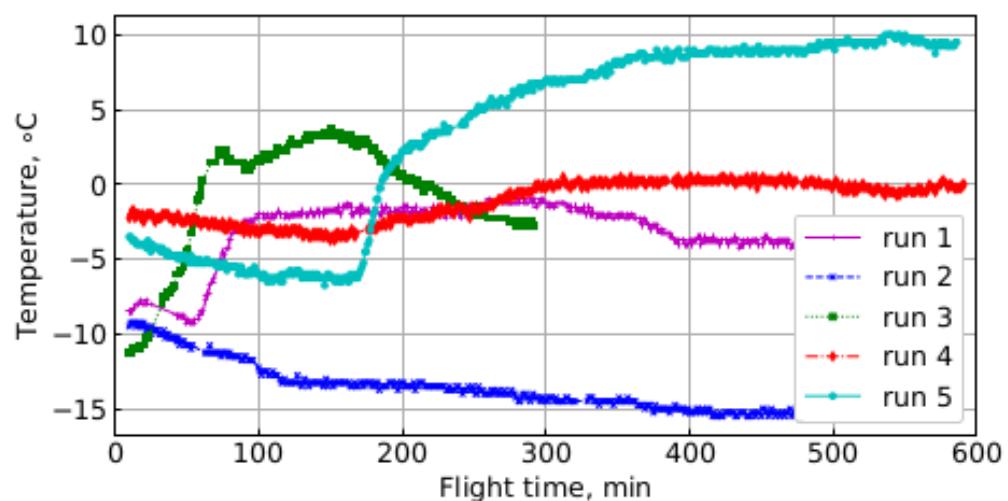


Figure 4: The temperature of PMT mosaic during 2013 runs.

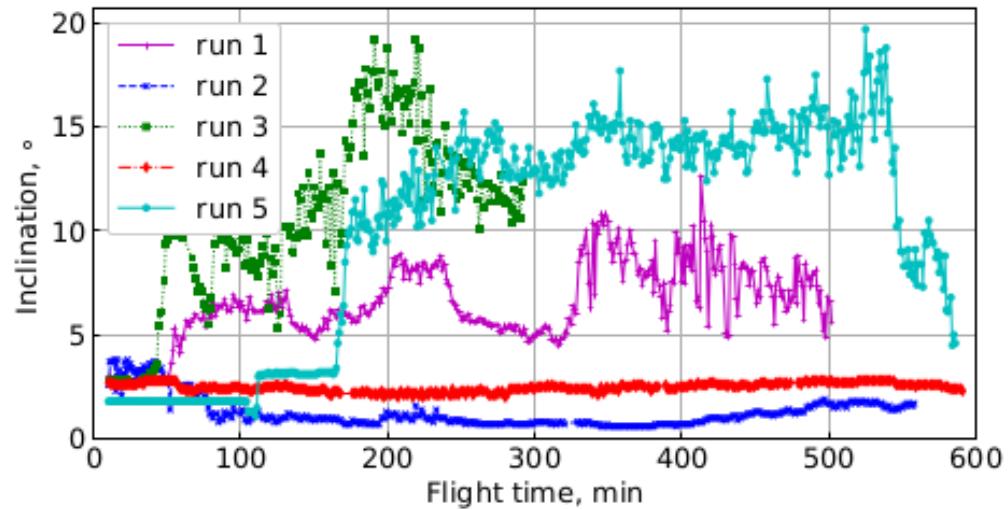
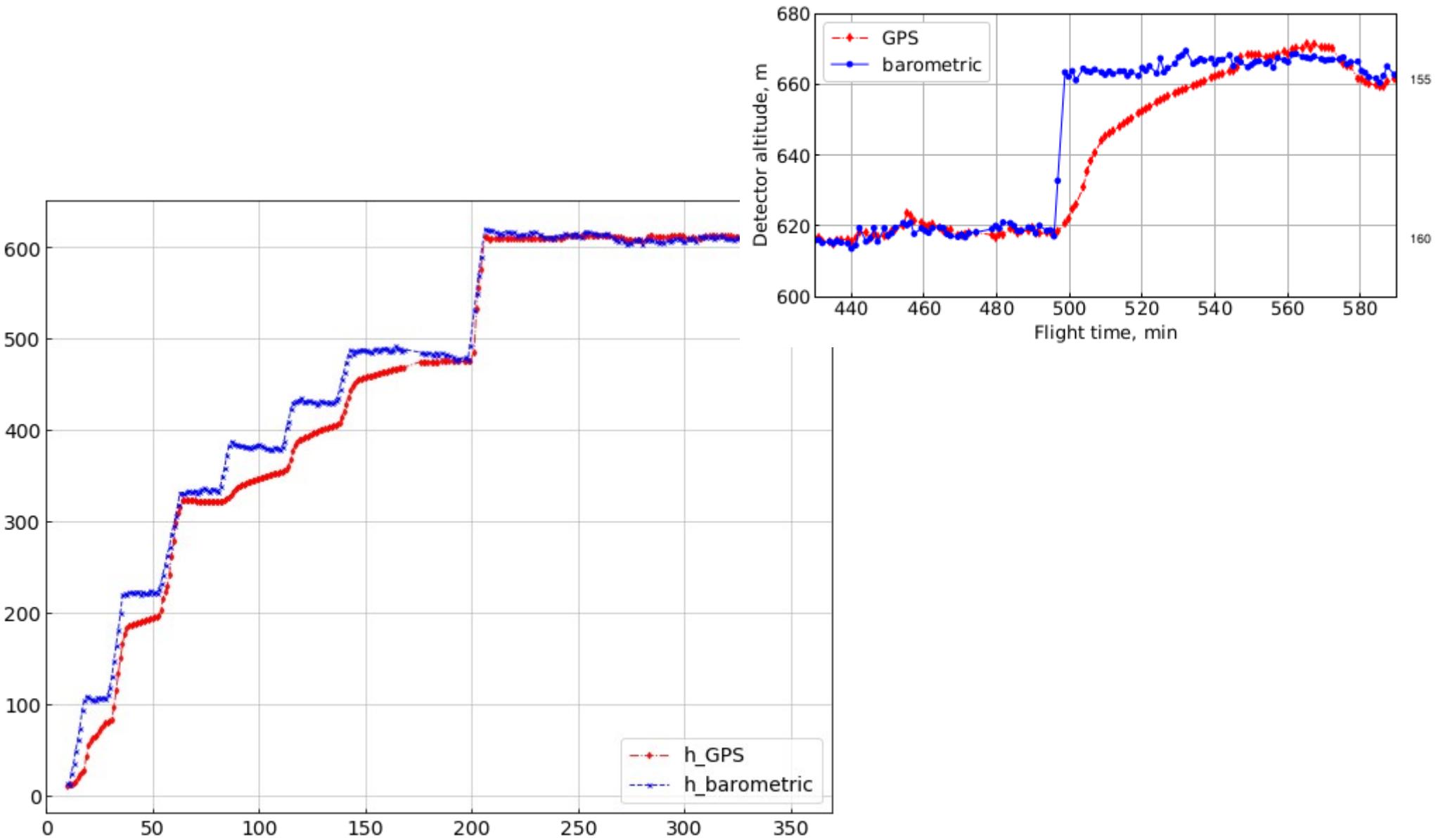


Figure 5: The detector inclination during 2013 experiment runs.

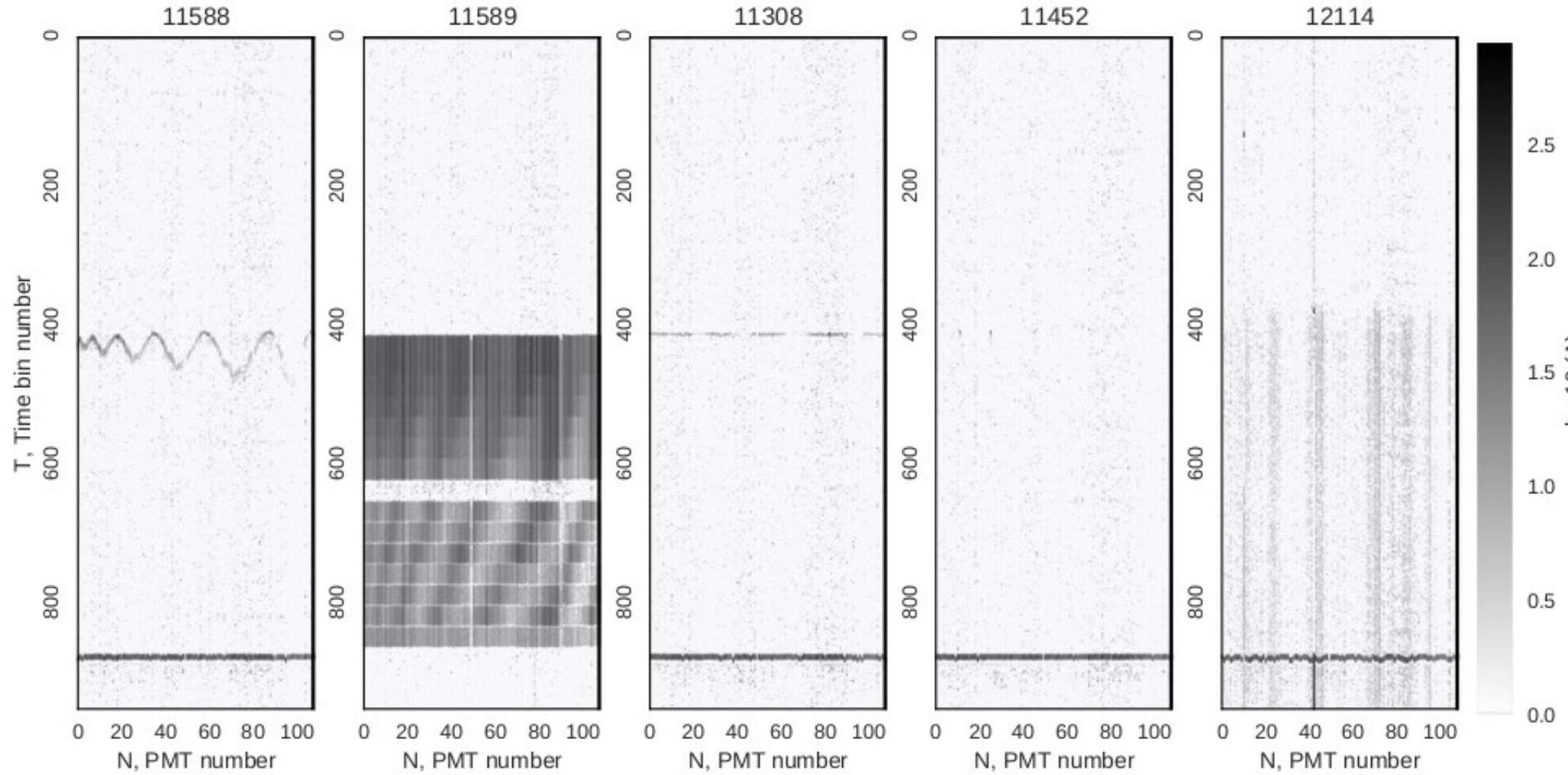
Коррекция высоты GPS



Статистика: 2008 – 2013

<i>Год</i>	<i>Общее время (час:мин)</i>	<i>Всего триггеров</i>	<i>Событий от ШАЛ</i>	<i>ФЭУ в мозаике</i>
2008	1:30	100	1	20
2010	29:10	1343	36	95
2011	33:03	20542	220	95
2012	31:12	7716	364	109
2013	33:17	3813	459	109
	129:12	33414	1080	

Триггерные события



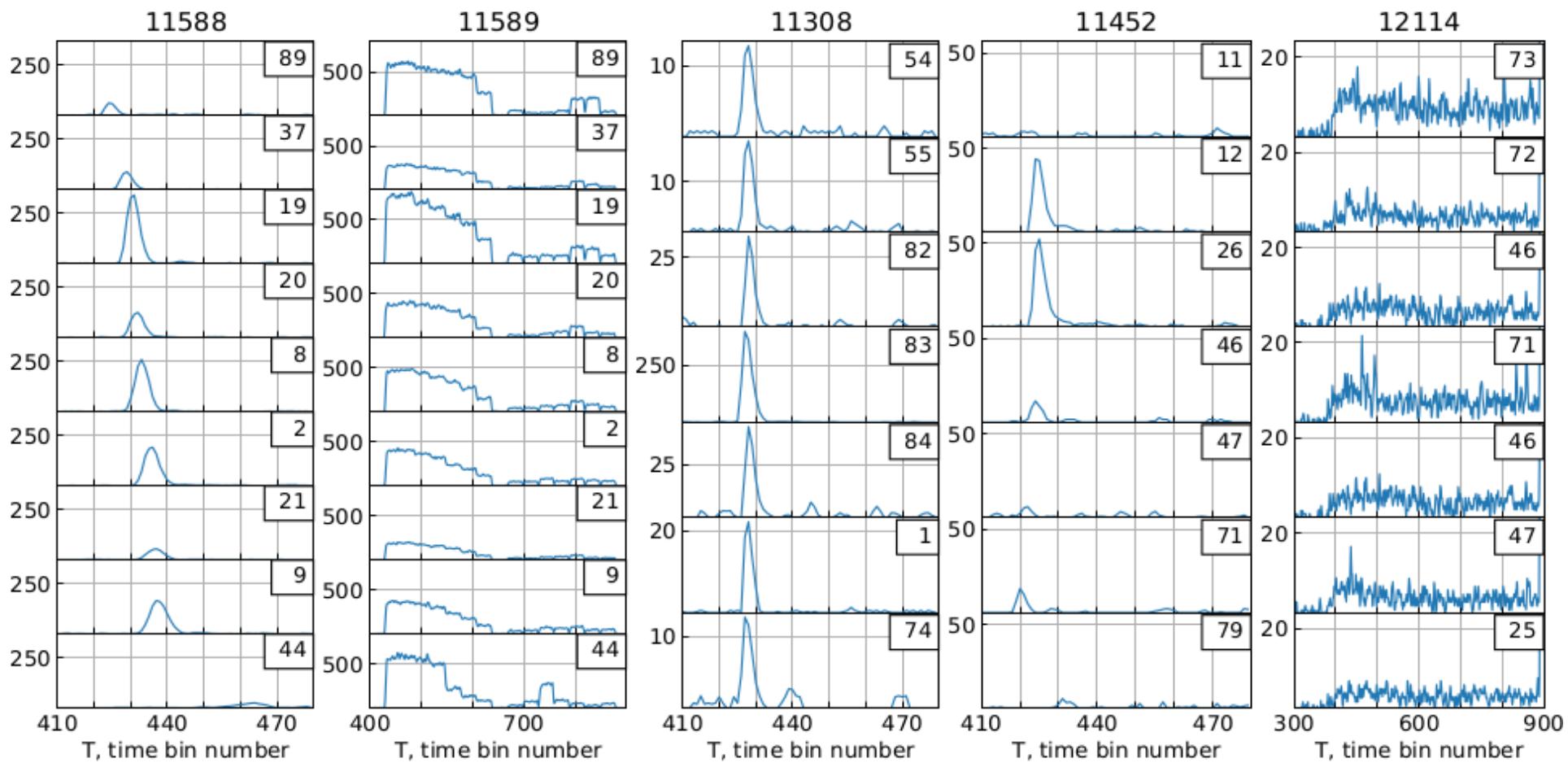
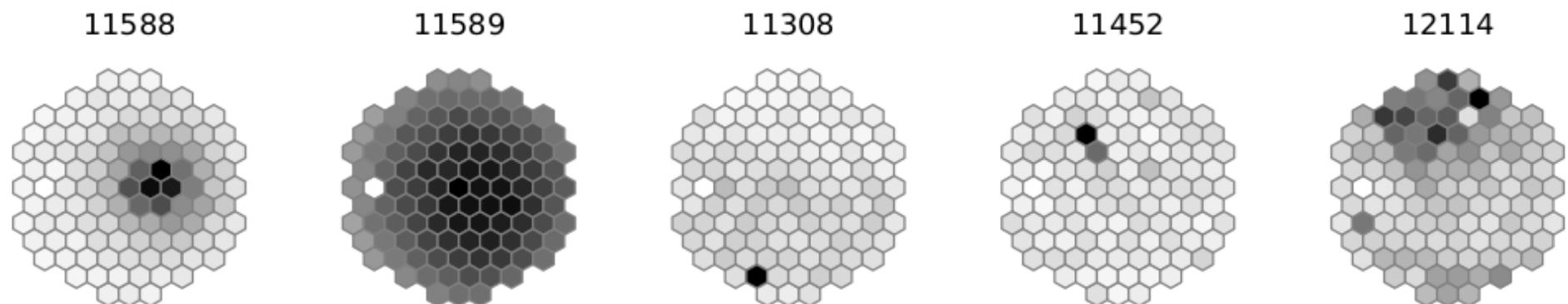
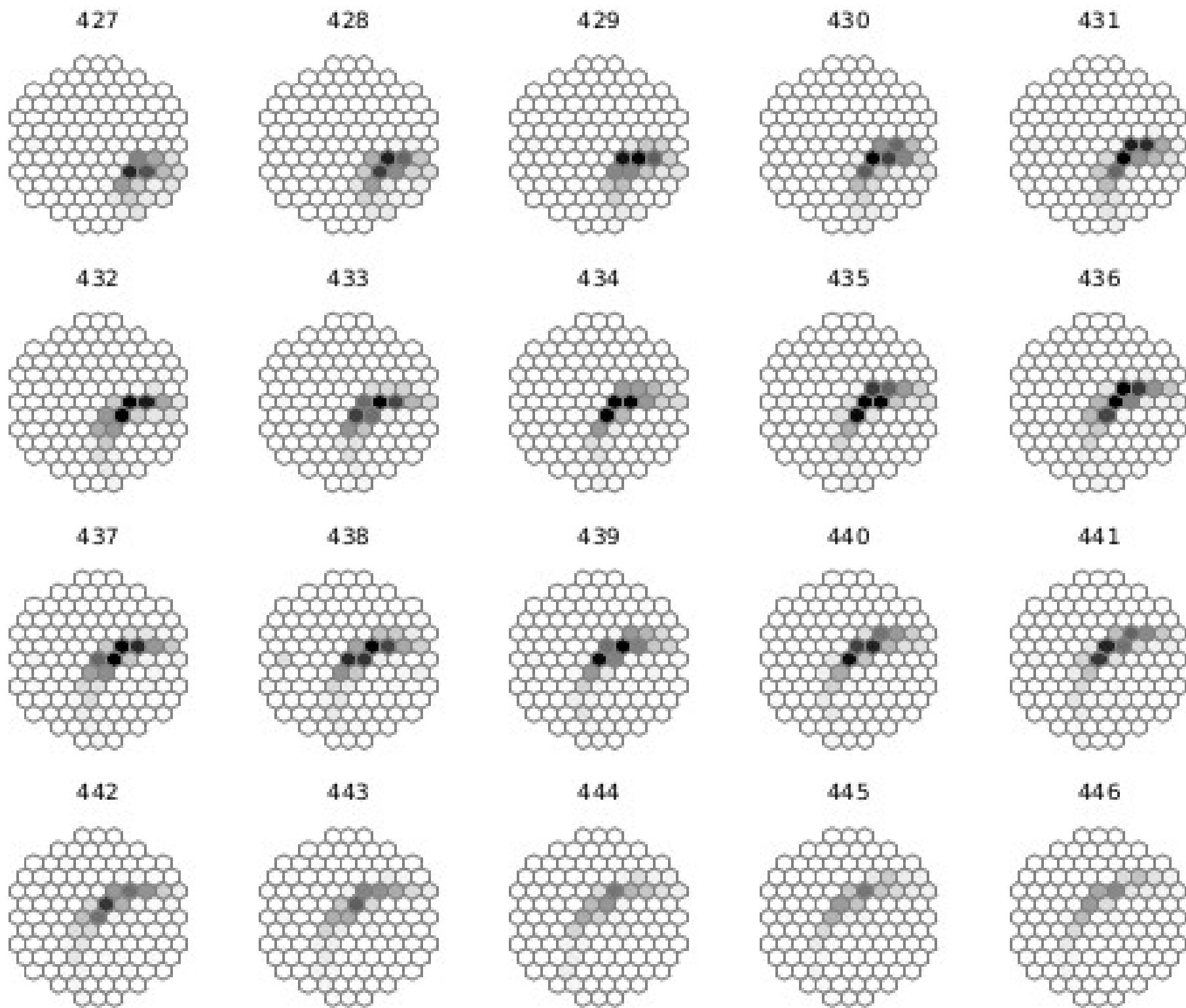


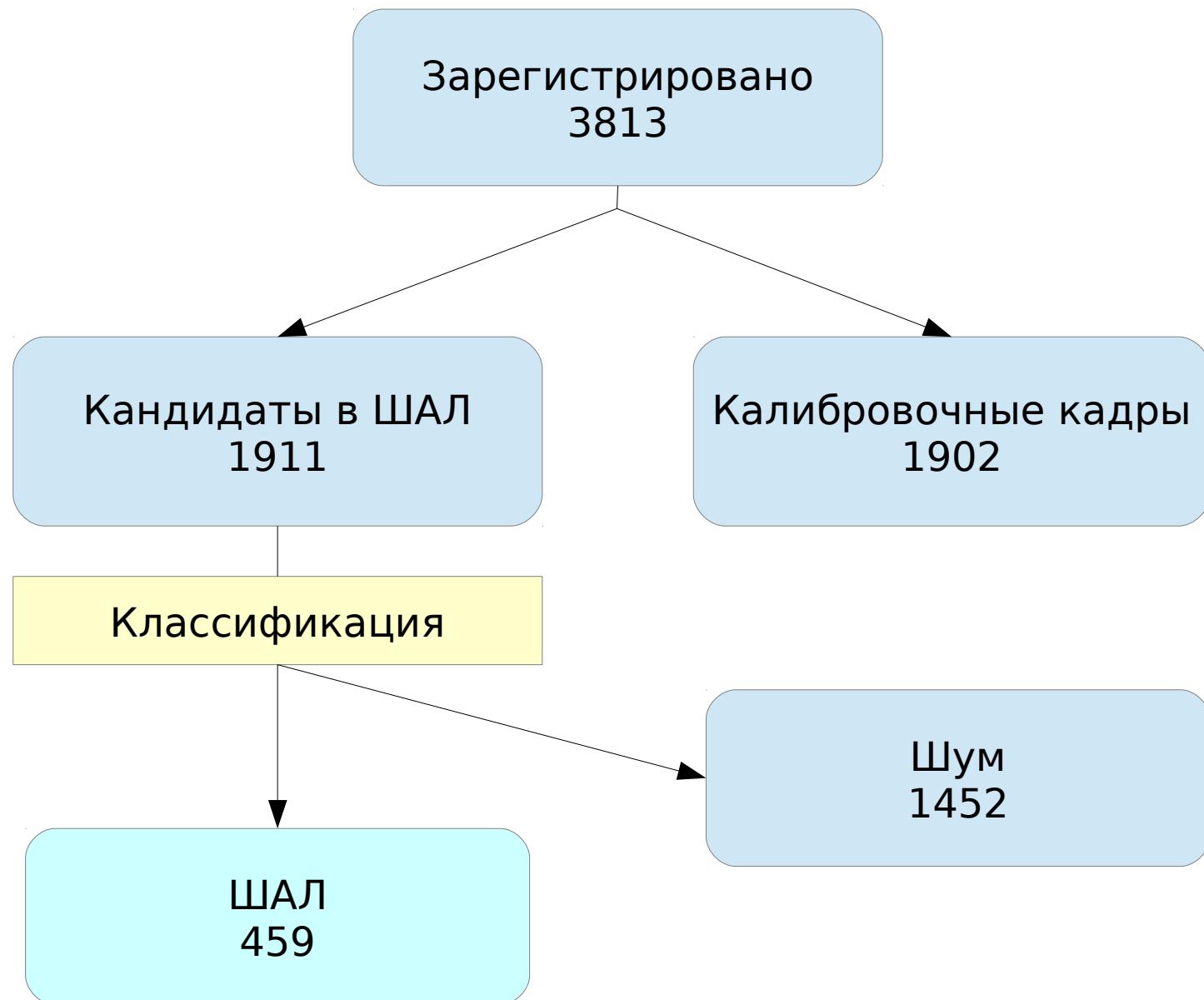
Figure 12: Pulses in some channels in the same frames as on Fig. 10. The baselines are subtracted, time drift is corrected, calibration coefficients are applied.



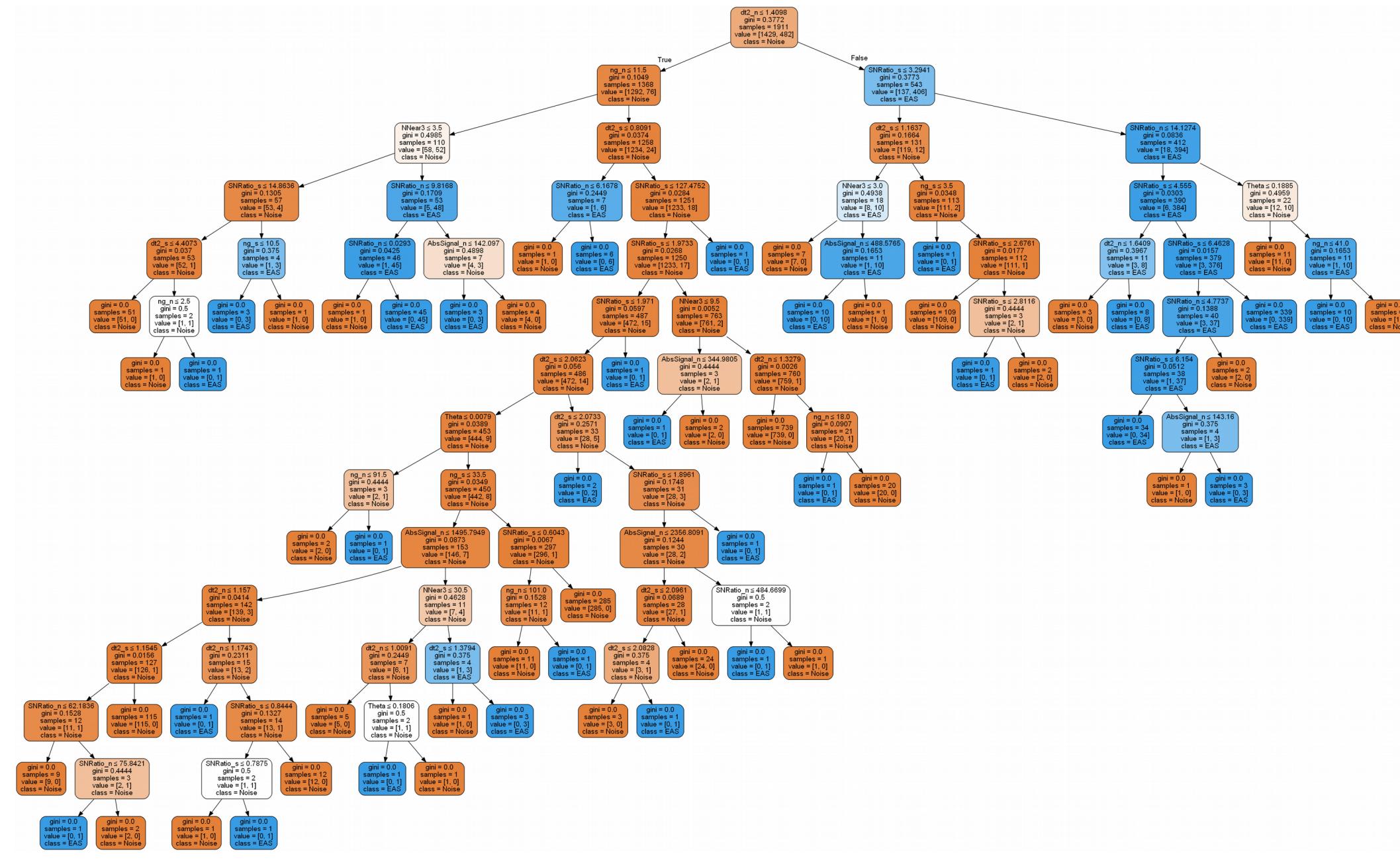


III. Развитие методов анализа данных

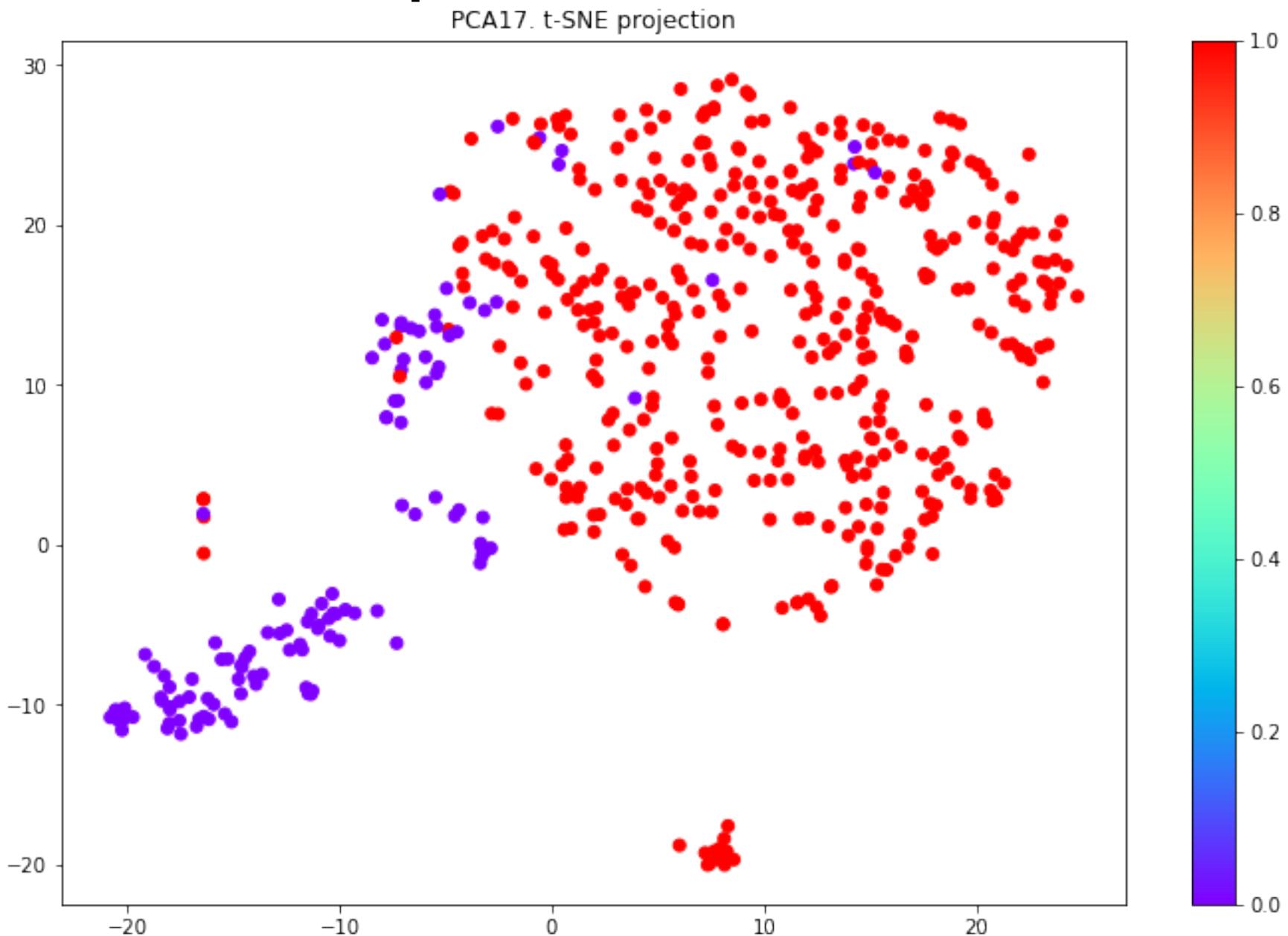
Классификация данных: 2013



Метод решающих деревьев



Кластеризация событий



Заявка на грант РФФИ

Развитие методов оценки
химического состава космического
излучения в области энергий
 10^{16} - 10^{18} эВ на основе
современных подходов к
обработке данных.

Заявка на грант РФФИ

Развитие методов оценки
химического состава космического
излучения в области энергий
 10^{16} - 10^{18} эВ на основе
современных подходов к
обработке данных.

Не поддержано

16 Публикаций

1. Подгрудков Д.А., Антонов Р.А., Бонвич Е.А., Чернов Д.В., и др. *Cosmic ray study by means of reflected EAS Cherenkov light method with the SPHERE-2 detector.* PoS, № ICRC2017, с. 1-8, 2017
2. Чернов Д.В., Антонов Р.А., Бонвич Е.А., и др. *Detector for the ultrahigh energy cosmic rays composition study in Antarctica.* Journal of Physics: Conference Series, том 798, № 1, с. 1-5, 2017
3. Чернов Д.В., Бонвич Е.А., Джатдоев Т.А., и др. *Position-sensitive SiPM detector for separation of Cherenkov and fluorescent light of EAS.* PoS, № ICRC2017, с. 1-86 2017.
4. Чернов Д.В., Антонов Р.А., Бонвич Е.А., и др. *The Prototype SPHERE-Antarctica Station and the Possibility of Using Silicon PMTs to Detect the Cherenkov and Fluorescent Light of EAS.* Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, том 81, № 4, с. 464-467, 2017
5. Чернов Д.В., Антонов Р.А., Бонвич Е.А., и др. *Прототип установки Сфера-Антарктида и возможности применения кремниевых ФЭУ для регистрации черенковского и флуоресцентного света ШАЛ.*
Известия Российской академии наук. Серия физическая, том 81, № 4, с. 499-503
6. **Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V., et.al.**
The LED calibration system of the SPHERE-2 detector. // Astroparticle Physics (77), 55-65, 2016
7. Chernov D.V., Antonov R.A., ..., Bonvech E.A., et.al *Detection of reflected Cherenkov light from extensive air showers in the SPHERE experiment as a method of studying superhigh energy cosmic rays.* // Physics of Particles and Nuclei (46)1, 60-93, 2015
8. Д. В. Чернов, Р. А. Антонов, ..., Е. А. Бонвич, и др. *Регистрация отражённого черенковского света ШАЛ в эксперименте <<СФЕРА>> как метод изучения космических лучей сверхвысоких энергий.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 46(1):115–166, 2015.
9. R. A. Antonov, ..., E. A. Bonvech, D. V. Chernov, et. al. *Results and prospects on registration of reflected cherenkov light of eas from cosmic particles above 10^{15} ev.* In Conference Proceedings-20th Prticles&Nuclei International Conference (25-29 August 2014, Hamburg, Germany), pages 411–415. Hamburg, Germany, 2015.

10. Antonov R.A., ..., Bonvech E.A., Chernov D.V., et.al., Status of the SPHERE experiment. // Journal of Physics: Conference Series (409)1, 12094-12097, 2013
11. Antonov R.A., ..., Bonvech E.A., Chernov D.V., et.al., Results on the primary CR spectrum and composition reconstructed with the SPHERE-2 detector. // Journal of Physics: Conference Series (409)1, 012088-012091, 2013
12. Anotov R.A., Aulova T.V., Bonvech E.A., et.al., Event-by-event study of CR composition with the SPHERE experiment using the 2013 data. // Journal of Physics: Conference Series (632)012090, 1-8, 2015
13. Chernov D.V., Antonov R.A., ..., Bonvech E.A., et.al., Investigation of SPHERE-2 Data Sensitivity to Chemical Composition of Primary Cosmic Rays. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics (79)3, 359-361, 2015
14. Antonov R.A., ..., Bonvech E.A., Chernov D.V., et.al., Status of the SPHERE experiment 2013. // Proc. of 33 rd International Cosmic Ray Conference, 1-3, 2013
15. R. A. Antonov, ..., E. A. Bonvech, et. al. First detailed reconstruction of the primary cosmic ray energy spectrum using reflected Cherenkov light. // Proc. of 33 rd International Cosmic Ray Conference, pages 1–4. Rio de Janeiro, 2013.
16. А. Антонов, С. П. Бесшапов, Е. А. Бонвич, и др. Реконструкция спектра всех ядер и исследование ядерного состава ПКЛ в эксперименте СФЕРА. // Известия Российской академии наук. Серия физическая, 77(11):1564–1567, 2013.

24 Доклада на конференциях

1. 2017 Cosmic ray study by means of EAS reflected Cherenkov light method with the SPHERE-2 detector (Устный)
35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Корея, Республика, 12-20 июля 2017
2. 2017 Position-sensitive SiPM detector for separation of Cherenkov and fluorescent light of EAS (Стендовый)
35th International Cosmic Ray Conference, Busan, Корея, Республика, 12-20 июля 2017
3. 2017 Детектор на кремниевых ФЭУ для выделения черенковского и флюоресцентного света ШАЛ (Устный)
Ломоносовские чтения - 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17-26 апреля 2017
4. 2017 Моделирование отклика детектора в эксперименте СФЕРА-2 (Устный)
Ломоносовские чтения - 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17-26 апреля 2017
5. 2017 Проект Сфера- Антарктида для изучения космических лучей сверхвысоких энергий (Устный)
Ломоносовские чтения - 2017, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 17-26 апреля 2017
6. 2016 Detector for the ultrahigh energy cosmic rays composition study in Antarctica (Устный)
The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics, Москва, Россия, 10-14 октября 2016
7. 2016 Моделирование и анализ данных в эксперименте СФЕРА-2 (Стендовый)
34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, Россия, 15-19 августа 2016
8. 2016 Применение кремниевых ФЭУ для регистрации черенковского и флюоресцентного света ШАЛ (Стендовый)
34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, Россия, 15-19 августа 2016
9. 2016 Прототип установки Сфера-Антарктида для изучения КЛ с энергией выше $5 \cdot 10^{18}$ эВ (Устный)
34-я Всероссийская конференция по космическим лучам, Дубна, Россия, 15-19 августа 2016
10. 2016 Анализ экспериментальных данных в эксперименте СФЕРА-2 (Устный)
Ломоносовские чтения - 2016, МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 18-27 апреля 2016
11. 2015 Выделение лёгких ядер ПКЛ при энергиях выше 10 ПэВ в эксперименте с отражённым черенковским светом СФЕРА-2
Зацепинские чтения 2015 г., Москва, ФИАН , Россия, 5 июня 2015
12. 2015 Мобильная астрофизическая обсерватория СФЕРА (Устный)
Ломоносовские чтения - 2015, МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 21-23 апреля 2015
13. 2014 Event-by-event study of CR composition with reflected Cherenkov light (Стендовый)
24th European Cosmic Ray Symposium, Kiel, Germany, Германия, 2014
14. 2014 Results and prospects on registration of reflected Cherenkov light of EAS from cosmic particles above 10^{15} eV (Устный)
20th International Conference on Particles and Nuclei (PANIC 14), Hamburg, Germany, Германия, 2014
15. 2014 Results on reflected EAS Cherenkov light registration in balloon-borne experiment SPHERE-2 (Устный)
16th JEM-EUSO International Meeting, Moscow, Россия, 2014
16. 2014 SPHERE-Antarctic registration of the Cherenkov and fluorescence light from EAS in the high altitude balloon experiment
16th JEM-EUSO International Meeting, Moscow, Россия, 2014
17. 2014 The new results of the SPHERE experiment, 40th COSPAR Scientific Assembly, Russia, Moscow, Россия, 2014
18. 2014 Изучение энергетического спектра и массового состава ПКЛ в области $10^{18}-10^{20}$ эВ аэростатной установкой в
Антарктиде (проект СФЕРА-Антарктида), 33-я Всероссийская конференция по космическим лучам, 2014
19. 2014 Исследование чувствительности к химическому составу ПКЛ по данным установки СФЕРА-2 (Устный)
33 Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна, 11-15 августа 2014), 2014
20. 2014 Перспективы метода регистрации отраженного ЧС ШАЛ для исследования состава ПКЛ с энергиями 1-1000 ПэВ
Ломоносовские чтения, 2014
21. 2014 Проект «СФЕРА-Антарктида» для изучения космических лучей в области $10^{18}-10^{20}$ эВ. (Устный)
Ломоносовские чтения, 2014
22. 2013 First detailed reconstruction of the primary cosmic ray energy spectrum using reflected Cherenkov light. (Устный)
33 rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013
23. 2013 Status of the SPHERE experiment 2013 (Стендовый)
33 rd International Cosmic Ray Conference, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013
24. 2013 Установка СФЕРА-2 для регистрации отраженного черенковского света ШАЛ. Новый метод - новые возможности
Шестые Черенковские чтения «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц», Москва, Россия, 2013

Доклады на конференциях

	Российские	Международные	Всего
2013	1	2	3
2014	5	4	9
2015	2	-	2
2016	4	1	5
2017	3	2	5
Всего	15	9	24

Гранты

Гранты		
Исследование космических лучей в области энергий 10-1000 ПэВ с помощью мобильной астрофизической обсерватории СФЕРА на озере Байкал	2013	410
Организация и проведение экспедиции на озере Байкал для работ с аэростатной установкой СФЕРА-2	2013	210
Исследование состава первичных космических лучей в области 10-1000 ПэВ по экспериментальным данным установки СФЕРА-2	2013-2014	1290
Позиционно-чувствительный детектор для выделения черенковского и флуоресцентного света ШАЛ	2015-2017	540
		2450

Информационный лист

Бонвич Елена Алексеевна (1972 г.р.)

Московский Государственный Университет имени М.В. Домоносова, Физический (1995)

кандидат физико-математических наук (с 1999 года),

Учитываются работы за период: **2013-2017**

Публикационная активность	количество работ	
	за период	всего
Всего статей в научных журналах	15	34
В том числе:		
в российских журналах из списка ВАК	4	10
в журналах из списка RSCI Web of Science	3	8
в зарубежных журналах из списка ВАК	11	24
в журналах из top25	1	2
Статьи в сборниках	2	12
Главы в коллективных монографиях	0	0
Монографий	0	0
Учебно-методические работы	0	0
Библиометрические показатели (по данным Web of Science)		
Н-индекс	2	
Общее число ссылок	15	
Число ссылок на статьи, опубликованные за период	4	

Личный вклад в работу

1. Создание программ автоматической работы установки СФЕРА-2 в эксперименте.
2. Обработка исходных экспериментальных данных
3. Моделирование работы установки
4. Обработка экспериментальных данных

Анализ событий ШАЛ

