



г. Дубна Московской области  
11-15 августа 2014 года

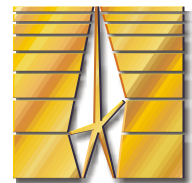


33-я Всероссийская конференция по космическим лучам

# ALEGRO

## ЧЕРЕНКОВСКАЯ ГАММА-ОБСЕРВАТОРИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

*Г.И. Васильев, Е.Е. Холупенко, Д.А. Байко, А.А. Кожберов,  
А.М. Быков, А.М. Красильщиков*



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе**  
**Российской академии наук**

Политехническая ул., 26, С.-Петербург, 194021  
Телефон: (812) 297-2245 Факс: (812) 297-1017  
post@mail.ioffe.ru <http://www.ioffe.ru>

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (грант 13-02-12017-офи-м)

## Аннотация

В работе представлены результаты моделирования широких атмосферных ливней от космических фотонов с энергиями 5 – 100 ГэВ. На основе выполненных расчетов предложена концепция и оценены основные параметры наземной черенковской гамма-обсерватории нового поколения. Одной из ключевых задач такой обсерватории будет исследование малоизученной области гамма-диапазона 5 – 50 ГэВ, что позволит выполнять высокочувствительные наблюдения остатков сверхновых звезд, пульсарных туманностей и гамма-всплесков, которые не могут быть проведены с нынешним поколением гамма-телескопов.

# Мотивация

В настоящее время существует проблема «разрыва» в доступном наблюдениям спектре космического гамма-излучения, которая состоит в следующем:

1) Потоки фотонов в диапазоне энергий 0.1 МэВ – 1 ГэВ от типичных гамма-источников достаточно велики и могут наблюдаться орбитальными приборами даже при не очень большой эффективной площади  $10^3 - 10^4$  см<sup>2</sup> (см., например, Abdo et al., *ApJ*, 703, 1249, 2009). Но на более высоких энергиях потоки гамма-излучения от тех же источников столь малы, что уже не могут быть достоверно зарегистрированы этими приборами в разумные сроки (1 – 2 года).

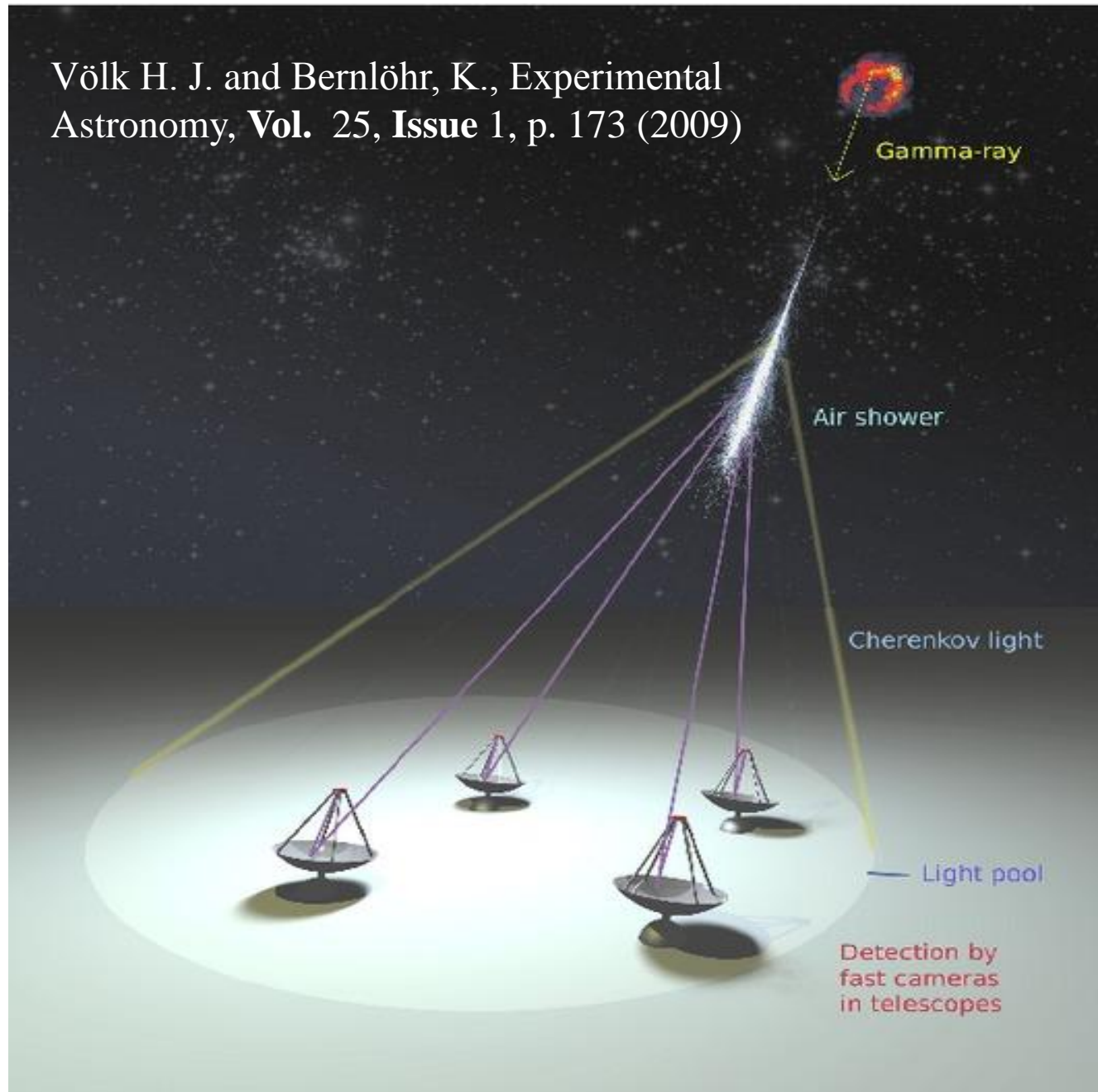
2) Апертура наземных гамма-телескопов достаточно велика ( $10^4 - 10^5$  м<sup>2</sup>), чтобы наблюдать даже небольшие потоки гамма-квантов от типичных космических источников на энергиях вплоть до 10-30 ТэВ (см. напр. Okumura et al., *ApJ*, 579, L9, 2002). Но в силу специфики метода регистрации (регистрируется не сам гамма-квант, а черенковская вспышка, порожденная им в атмосфере Земли) современные наземные гамма-телескопы не могут достоверно регистрировать космические гамма-кванты с энергиями менее 30-50 ГэВ.

Таким образом, в настоящее время в наблюдаемых гамма-спектрах космических объектов почти всегда (за исключением самых ярких объектов, напр. Aleksic et al., A&A, 544, A142, 2012) имеется разрыв с характерными границами 5 – 50 ГэВ. Проблема нехватки информации о свойствах гамма-спектров в диапазоне «разрыва» усугубляется тем, что для некоторых типов источников (например, для микроквазаров Bednarek, MNRAS Letters, 418, L49, 2011) в этом диапазоне можно предполагать существенные изменения свойств спектров или наличие спектральных особенностей (напр. экспоненциальный "завал" в спектрах пульсаров Abdo et al., ApJ, 744, 146, 2012).

**Для того чтобы ликвидировать недостаток информации о свойствах гамма-спектров ряда космических объектов в физически важном диапазоне 5 – 50 ГэВ и существенно улучшить статистику на более высоких энергиях, уже доступных наземным наблюдениям, мы предлагаем проект новой наземной черенковской гамма-обсерватории ALEGRO.**

# Принцип действия наземных черенковских гамма-телескопов

Völk H. J. and Bernlöhr, K., *Experimental Astronomy*, Vol. 25, Issue 1, p. 173 (2009)



# Цели и задачи моделирования в рамках проекта ALEGRO

Одной из необходимых стадий работы над проектом наземной черенковской гамма-обсерватории является численное моделирование для определения характеристик разрабатываемого инструмента (пороговой энергии наблюдений, углового и энергетического разрешения, предельных углов наблюдения, чувствительности к атмосферным и геомагнитным условиям и т.д.), которое включает в себя следующие этапы:

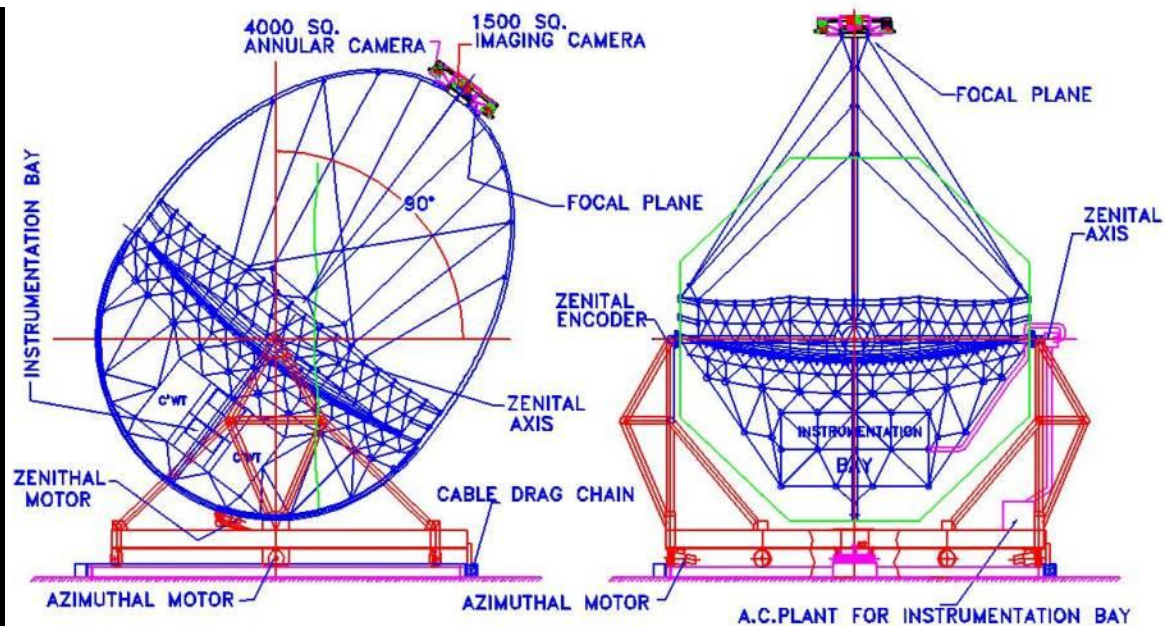
- 1) Моделирование широких атмосферных ливней, вызванных энергичными космическими частицами, и их компоненты, наблюдаемой обсерваторией – черенковского излучения
- 2) Моделирование телескопа в рамках заданной концепции и дизайна
  - a) моделирование светособирающей части телескопа – зеркала
  - b) моделирование регистрирующей камеры
- 3) Моделирование обработки наблюдательных данных
  - a) моделирование аппаратной обработки данных
  - b) моделирование программной обработки данных

Моделирование выполняется с помощью оригинального пакета кодов  
**ALEGRO Soft**

# Прототипы проекта

Прототипами обсерватории ALEGRO могут служить действующие наземные гамма-обсерватории H.E.S.S. II, MAGIC II и планируемая обсерватория MACE.

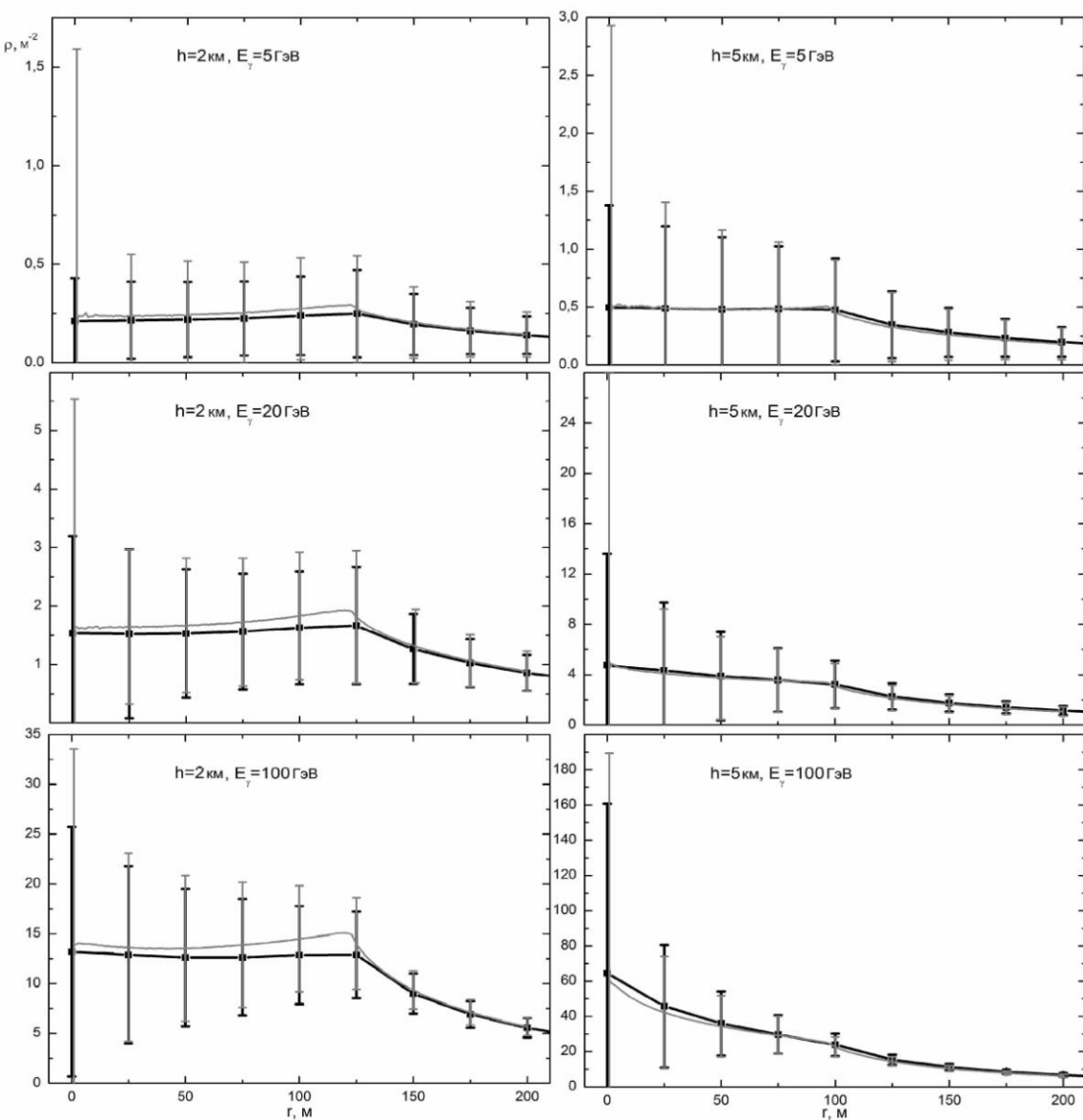
	MACE, K. Yadav, VHEPU 2013	ALEGRO
Диаметр зеркала, м	21	30
Высота стояния а.с.л., м	4200	~5000
Пороговая энергия, ГэВ	~20	~5
Количество пикселей	1088	11310



Дизайн телескопа MACE

<http://www.barc.gov.in/pg/nrl-harl/mace.html>

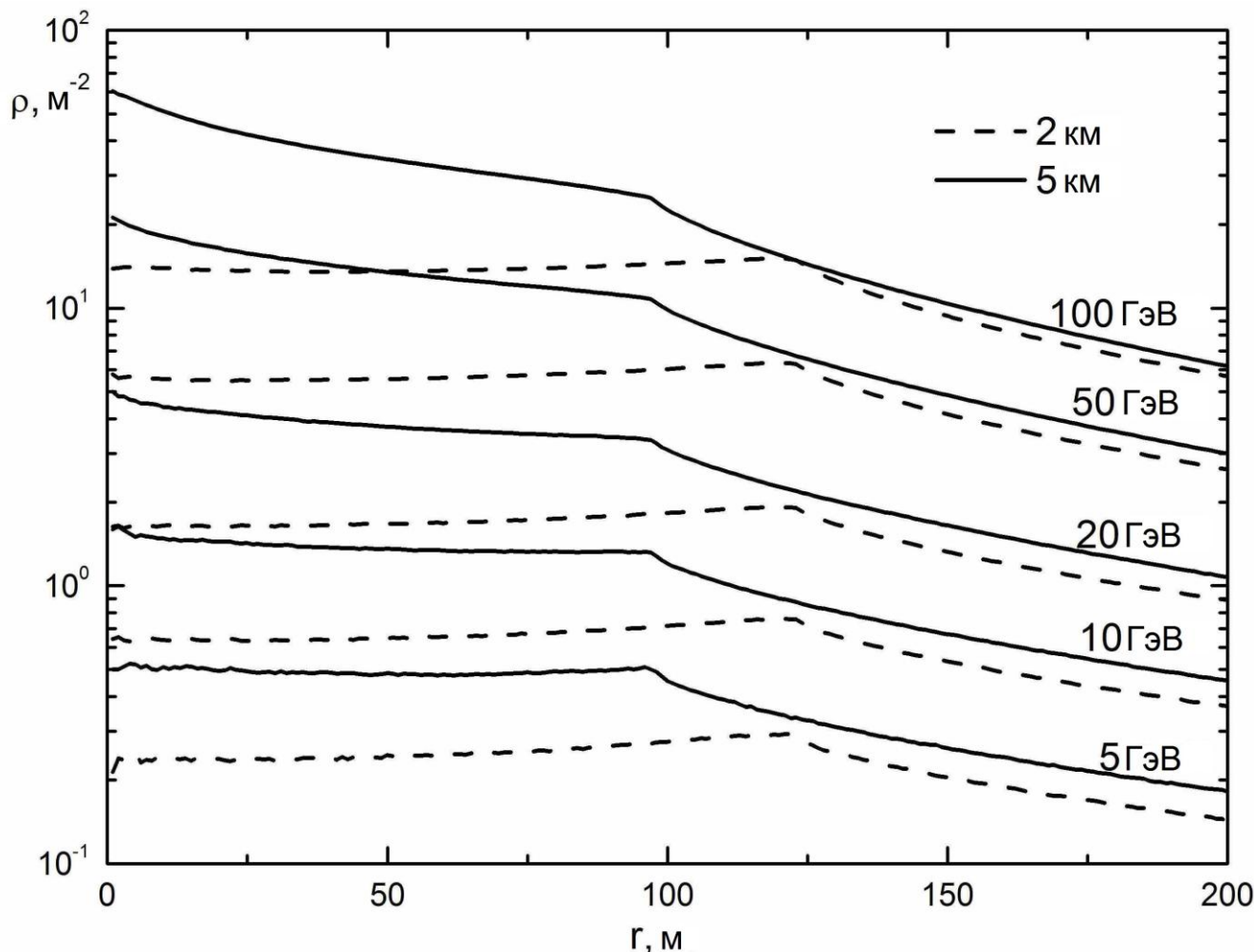
# Оригинальный код для моделирования ШАЛ



Необходимость создания оригинального кода в пакете ALEGRO Soft для моделирования ШАЛ (на основе пакета библиотек GEANT) продиктована тем, что существующие коды не полностью приспособлены для моделирования ШАЛ от первичных частиц относительно низких энергий ( $<20$  ГэВ). Например, CORSIKA объединяет черенковские фотоны в пучки с идентичными направляющими векторами, что не позволяет корректно моделировать изображение ШАЛ в телескопе в случае если в фокальную плоскость попадает  $10^2 - 10^3$  черенковских фотонов. Тем не менее результаты работы кодов допускают статистическое сравнение, примеры которого представлены на рисунке слева: показаны графики зависимости поверхностной плотности черенковских фотонов (ППЧФ,  $m^{-2}$ ) от расстояния до оси ливня  $r$ , м. Черные кривые показывают результаты, полученные с помощью оригинального кода ALEGRO Soft, серые кривые показывают результаты, полученные с помощью кода CORSIKA. Показанные среднеквадратичные отклонения соответствуют  $1\sigma$ . Энергия первичного гамма-кванта и высота наблюдения над уровнем моря указаны на графиках.



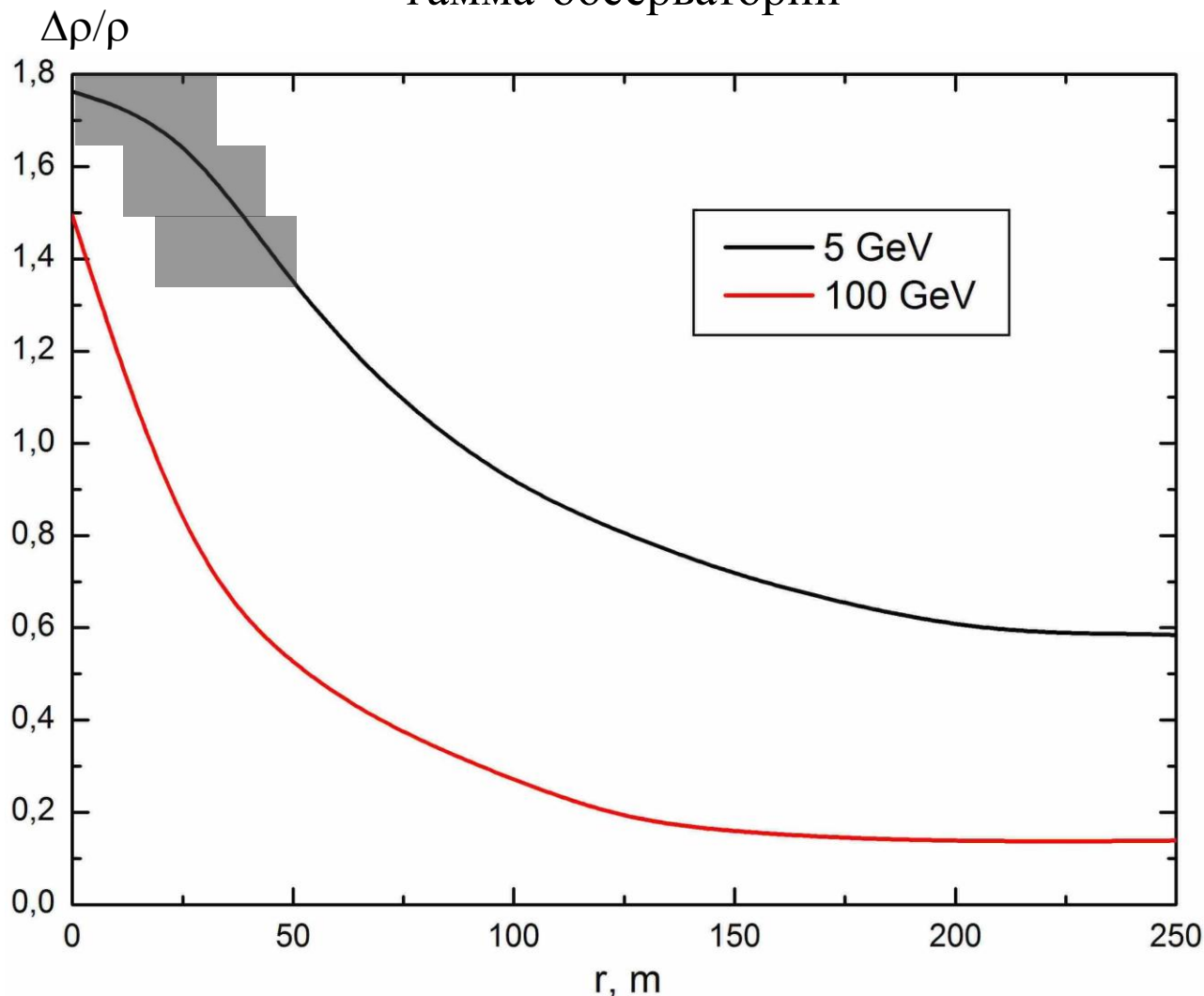
# Преимущество размещения планируемой гамма-обсерватории на большой высоте



Зависимость среднего значения ППЧФ от расстояния до оси ливня для различных энергий первичного гамма-кванта (указаны рядом с кривыми) и высот наблюдения.

Эффективность наземной гамма-обсерватории напрямую зависит от количества черенковских фотонов, которое может быть собрано зеркалами телескопов. На высоте 5 км средняя поверхностная плотность черенковских фотонов (ППЧФ), соответствующая одной и той же энергии первичных частиц, может **более чем в два раза** превышать ППЧФ на высоте 2 км, на которой расположены гамма-обсерватории H.E.S.S. и MAGIC.

## Оценка энергетического разрешения гамма-обсерватории



Относительная величина флуктуаций ППЧФ  $\Delta\rho/\rho$  как функция расстояния до оси ливня, рассчитанная по серии событий. Серым цветом показана область, где приведенный результат несправедлив (Васильев и др., НТВ СПбГПУ, № 4 (134), 79, 2011)

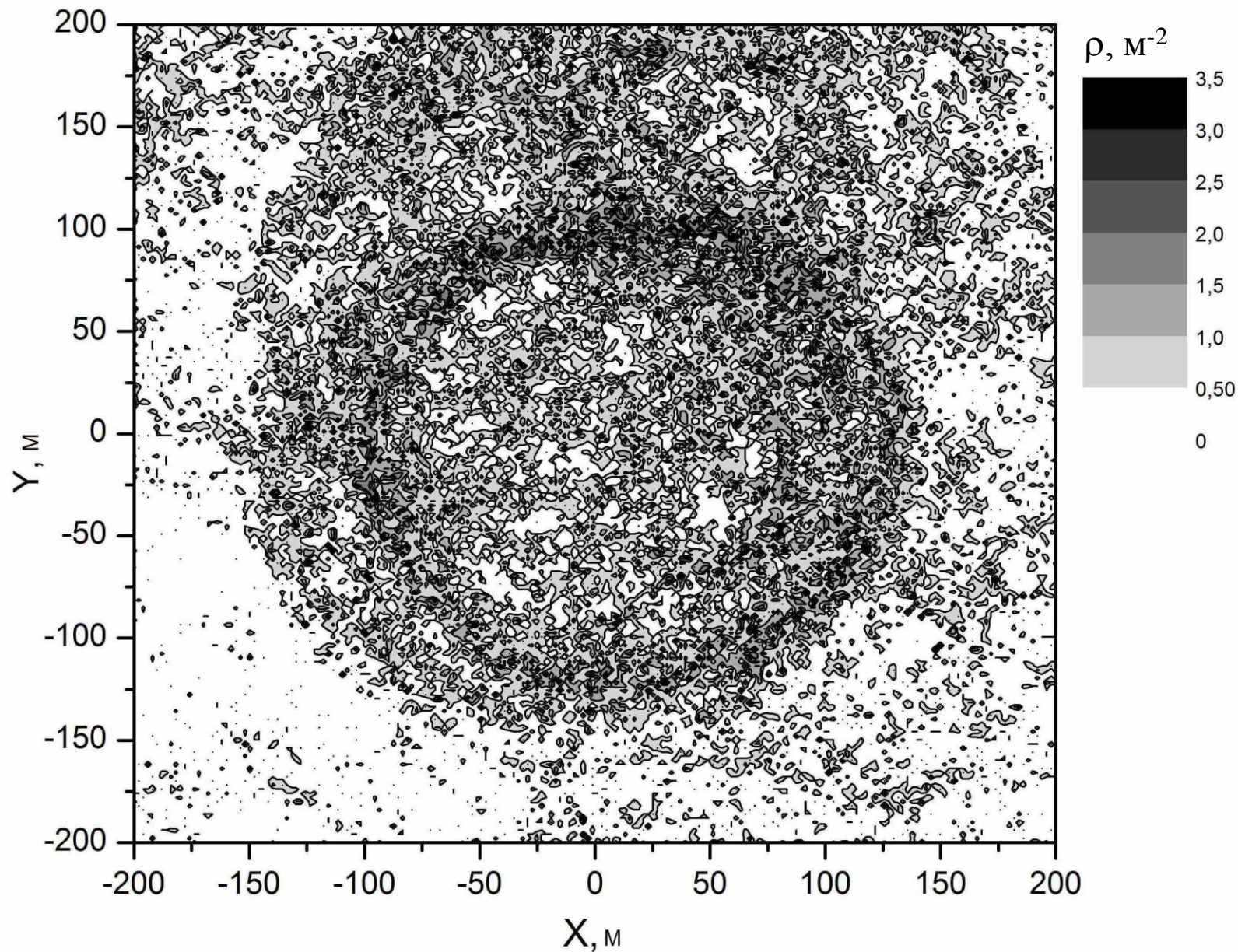
Энергия  $E$  первичной частицы оценивается по значению ППЧФ  $\rho$ . Таким образом, энергетическое разрешение зависит от величины флуктуаций ППЧФ:

$$\Delta E/E \approx \Delta\rho/\rho.$$

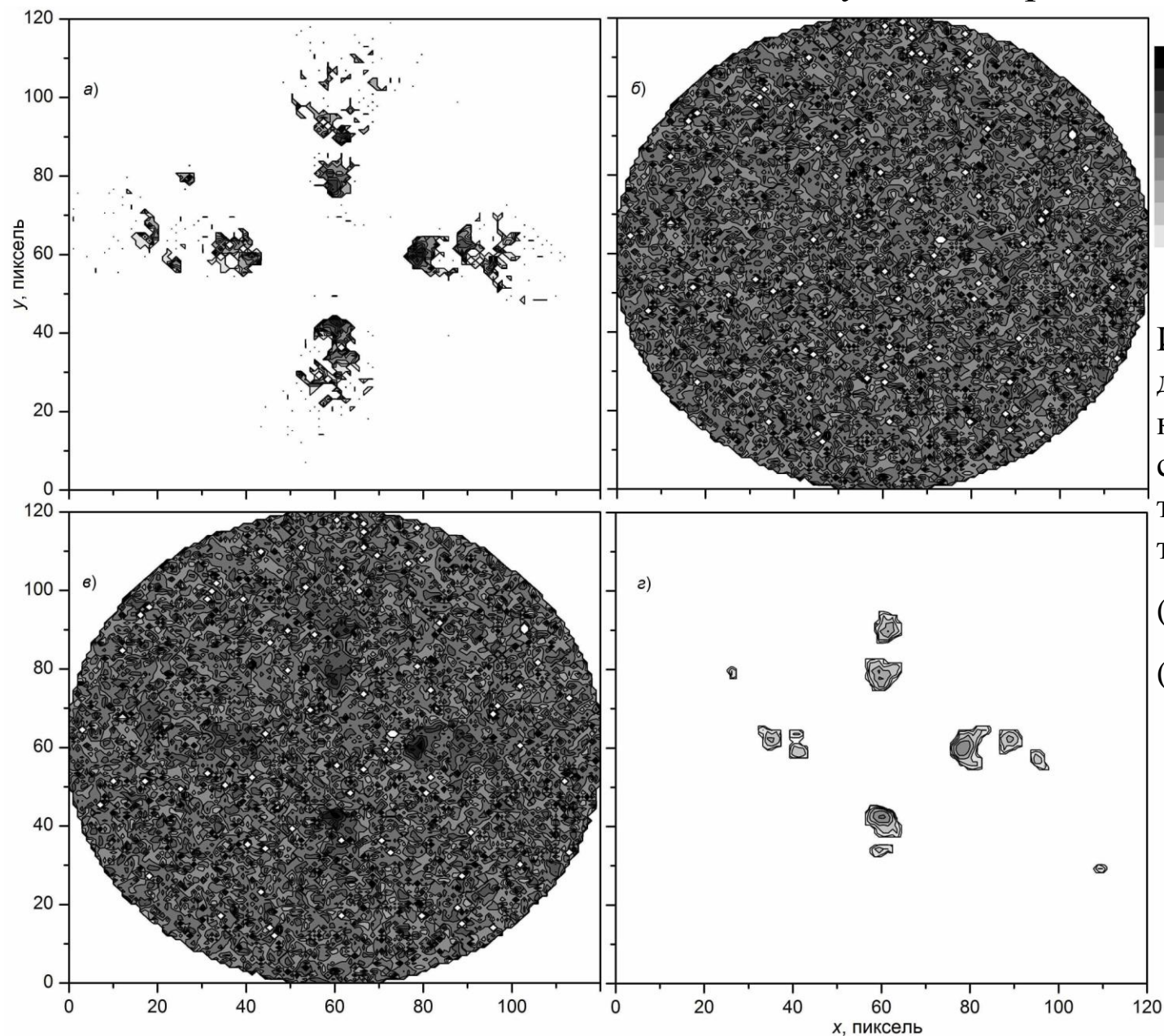
В работе Васильева и др. 2011 было показано что у ППЧФ от первичных гамма-квантов с энергией около 5 ГэВ отсутствует среднеквадратичное отклонение в области ствола ливня ( $r < 50$  м).

Тем не менее планируемая конфигурация обсерватории предполагает, что как минимум один из четырех телескопов обсерватории будет находится вне ствола ШАЛ, что позволяет ожидать величину энергетического разрешения  $\Delta E/E \sim 1$  при энергии первичного гамма-кванта 5 ГэВ

Пример распределения ППЧФ ШАЛ, вызванного первичным гамма-квантом с энергией 5 ГэВ, на высоте 5 км над уровнем моря

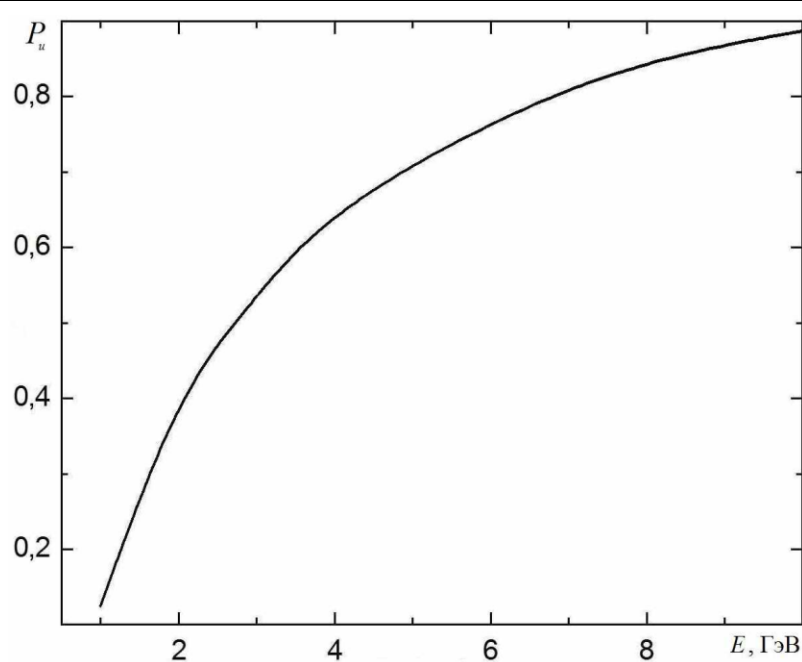


# Пример моделирования сигнала, формирующегося в фокальной плоскости телескопа, и его последующей обработки



Изображения получены для события, ППЧФ которого приведена на слайде 11. Четыре телескопа расположены в точках с координатами (100 м, 0 м), (0 м, 100 м), (-100 м, 0 м), (0 м, -100 м)

**Пояснение к рисунку на слайде 12.** Изображения в фокальных плоскостях телескопов (для удобства восприятия фокальные плоскости всех телескопов приведены на одном рисунке): Цвет отражает интенсивность засветки пикселя на рис. *а, б, в*, т.е. количество фотонов (натуральное число), попавших в пиксель в течение временного промежутка характерной длительности 10 нс. *а* – черенковская вспышка, сформировавшаяся при взаимодействии гамма-кванта (энергией 5 ГэВ) с атмосферой; *б* – оптический фон ночного неба; *в* – совместное изображение *а* и *б* – модель реального сигнала поступающего в камеру телескопа; *г* – изображение, полученное из изображения *в* путем моделирования регистрации сигнала с эффективностью  $0.30 \pm 0.07$  единиц/фотон и последующей обработки фильтром ALEGRO Soft для очистки от оптического фона. Максимальные значения интенсивностей составляют 30 фотонов/пиксель (*а*), 18 ф/п (*б*), 35 ф/п (*в*), 5 единиц/пиксель (*г*). Для всех изображений справедлива единая цветовая шкала, показанная справа от изображения (*б*). Разница в размерности и амплитуде величин, приведенных на рис. *в* и *г* объясняется учетом эффективности детектирования фотонов и особенностями математической обработки сигнала согласно разработанному алгоритму.

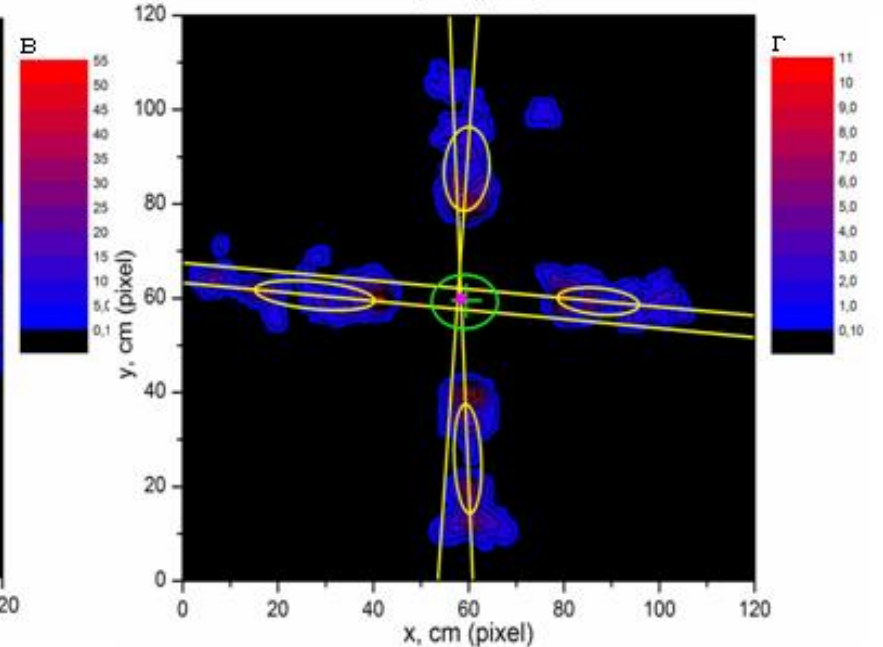
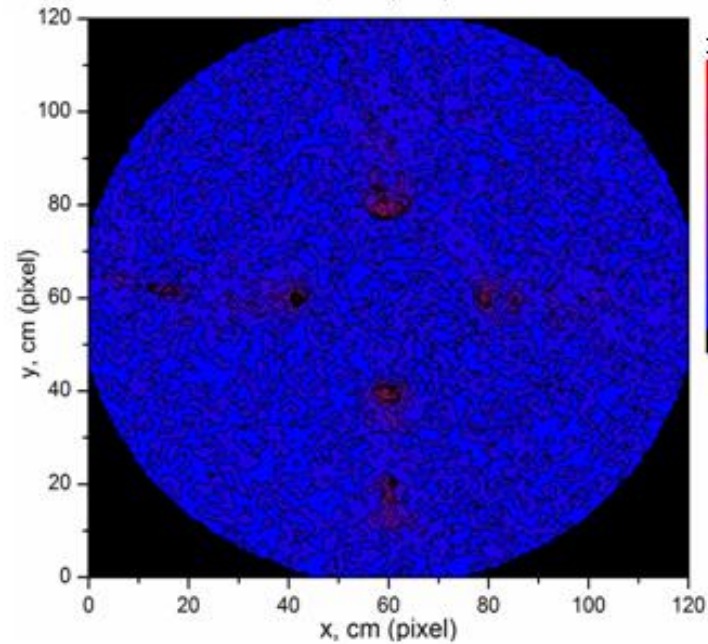
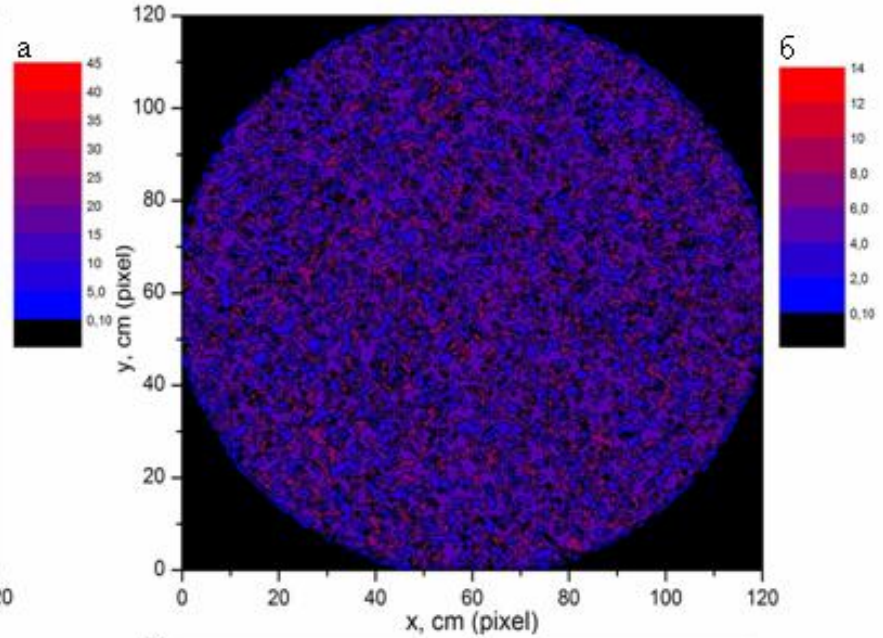
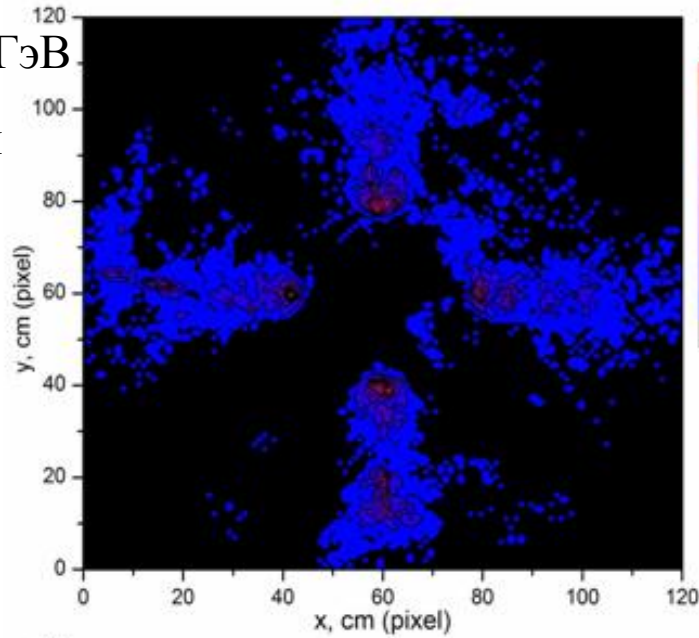


Наличие оптического фона ночного неба и необходимость очистки изображения приводят к потерям полезной информации и снижению вероятности регистрации космических гамма-квантов. На рисунке слева представлена оценка вероятности регистрации гамма-кванта при малых зенитных углах наблюдения (Васильев и др., НТВ СПбГУ, №3 (153), 191, 2012). В данном случае «регистрация» - наличие как минимум одного пикселя с ненулевой амплитудой сигнала после обработки фильтром ALEGRO Soft [т.е. наличие ненулевого пикселя на изображении типа *г*]. Такой метод регистрации позволяет измерять кривые блеска гамма-вспышек  $N_{\gamma}(t)$ .

# Определение направления прихода первичной частицы и оценка углового разрешения планируемой обсерватории

$E_\gamma = 20$  ГэВ

$h = 5$  км



**Пояснение к рисунку на слайде 14.** а) Изображения черенковской вспышки в фокальных плоскостях четырех телескопов. Данная черенковская вспышка вызвана ШАЛ от вертикально падающего гамма-кванта энергии 20 ГэВ. Изображение получено в процессе моделирования ШАЛ с помощью симулирующей части пакета ALEGRO Soft; б) Изображение, формирующееся оптическим фоном ночного неба в фокальной плоскости телескопа за 10 нс. Изображение получено с помощью симулятора оптического фона ночного неба пакета ALEGRO Soft; в) Совместное изображение черенковской вспышки и оптического фона - модель реального сигнала, регистрируемого гамма-обсерваторией; г) Изображение после обработки аналитической частью пакета кодов ALEGRO Soft: произведена очистка от оптического шума и анализ параметров Хилласа для определения направления прихода первичной частицы. Желтые эллипсы - фитирующие эллипсы Хилласа, направление больших главных осей которых показывает направление развития ШАЛ в атмосфере. Желтые прямые показывают направление больших главных осей эллипсов Хилласа. Розовая точка показывает восстановленное направление прихода первичного гамма-кванта, вычисленное по усредненному значению координат пересечений желтых прямых (отобранных в соответствии с заданными критериями). Зеленый крест показывает координаты истинного направления прихода первичного гамма-кванта. Зеленый эллипс - контур доверительного определения направления прихода первичной частицы по уровню  $1\sigma$ , определяющий угловое разрешение телескопа при данном алгоритме обработки. Размер большой полуоси зеленого эллипса соответствует примерно  $0.16^\circ$ . Данное угловое разрешение рассчитано как среднеквадратичное отклонение восстановленных направлений прихода первичных гамма-квантов по примерно 8% изображений, отобранным для анализа в соответствии с заданными критериями из  $10^5$  исходных изображений типа в) [пар событие-фон, сгенерированных из серии в 500 событий и 200 реализаций оптического фона]. Полное поле зрения телескопов обсерватории  $2.9^\circ$  соответствует 120 пикселям. Оценка проведена для вертикального падения кванта, но остается справедливой для малых зенитных углов наблюдения.

# Заключение

1. Среднее значение поверхностной плотности черенковских фотонов (ППЧФ) достаточно велико для регистрации космических  $\gamma$ -квантов энергии 5 ГэВ с помощью системы оптических телескопов с диаметром зеркала 30 м, установленной на высоте 5 км. Также оценки показывают, что при размещении на высоте 5 км, гамма-обсерватория будет иметь как минимум в полтора раза более низкую пороговую энергию наблюдений, чем при размещении на высоте 2 км при прочих равных условиях.
2. Влияние оптического фона ночного неба существенно для процесса регистрации космических  $\gamma$ -квантов в диапазоне 1 - 10 ГэВ, но тем не менее еще не является непреодолимым природным препятствием для регистрации космического гамма-излучения, в частности измерения кривых блеска гамма-вспышек. Вероятность регистрации гамма-кванта (без сохранения информации об энергии и направлении прихода, что тем не менее, достаточно для измерения кривых блеска  $N_\gamma(t)$ ), составляет около 50% для гамма-квантов с энергией 3 ГэВ при малых зенитных углах наблюдения.
3. Ожидаемое энергетическое разрешение  $\Delta E/E$  составляет  $\sim 1$  на энергии 5 ГэВ и  $\sim 0.2$  на энергии 100 ГэВ.
4. Путем выбора критериев отбора анализируемых изображений может быть достигнуто угловое разрешение  $0.16^\circ$  на энергии 20 ГэВ при малых зенитных углах наблюдения.

Моделирование показывает, что обсерватория ALEGRO в случае реализации будет эффективным инструментом для наблюдений космических источников гамма-излучения в диапазоне энергий свыше 5 ГэВ. Эта обсерватория позволит решить ряд актуальных задач экспериментальной гамма-астрономии и астрофизики высоких энергий.