

Шустова Ольга Павловна

Космические лучи предельно высоких энергий:
интерпретация экспериментальных данных и перспективы
дальнейших исследований

01.04.23 – физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре физики космоса физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, профессор **Калмыков Николай Николаевич**

Официальные оппоненты:

Роганова Татьяна Михайловна, доктор физ.-мат. наук, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова (г. Москва), зав. лабораторией теории электронно-фотонных ливней отдела излучений и вычислительных методов

Рубцов Григорий Игоревич, кандидат физ.-мат. наук, Учреждение Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН (г. Москва), научный сотрудник отдела теоретической физики

Ведущая организация:

Государственное учреждение Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова Российской академии наук (г. Троицк)

Защита состоится «__» _____ 2012 года в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета Д501.001.77, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119234, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-й корпус НИИЯФ МГУ), ауд. 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова.

Автореферат разослан «__» _____ 2012 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук, профессор

С. И. Страхова

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Космические лучи (КЛ) предельно высоких энергий (ПВЭ) привлекают особое внимание начиная с 1966 г., когда Грейзен, Зацепин и Кузьмин предсказали обрезание спектра протонов от далеких источников при энергиях выше $\sim 6 \cdot 10^{19}$ эВ (ГЗК-порог) в результате взаимодействия с реликтовыми фотонами.

Поток КЛ с энергиями $\gtrsim 10^{19}$ эВ составляет примерно одну частицу на квадратный километр в год. Регистрация столь редких событий прямыми методами невозможна. Однако земная атмосфера является прекрасным инструментом для косвенного измерения характеристик КЛ ПВЭ. При взаимодействии первичной частицы КЛ с ядрами элементов, входящих в состав атмосферы, рождается каскад вторичных частиц, так называемый широкий атмосферный ливень (ШАЛ), и первоначальная энергия E_0 распределяется между ними. Именно вторичные частицы ШАЛ, а также оптические излучения, создаваемые заряженными частицами ливня, и используются для регистрации КЛ ПВЭ, при этом создаются гигантские установки с площадью в сотни-тысячи квадратных километров. Процедура восстановления типа и энергии первичной частицы по экспериментальным данным требует знания процессов взаимодействия адронов в области предельно высоких энергий. На сегодняшний день таких сведений нет: спектр КЛ ПВЭ протягивается до $\sim 3 \cdot 10^{20}$ эВ, что примерно на три порядка выше эквивалентной энергии, которая получена на самом крупном ускорителе – Большом Адронном Коллайдере. Поэтому современные модели адронных взаимодействий опираются на данные, известные при более низких энергиях, и результаты, предсказанные в рамках той или иной модели, могут существенно различаться.

До сих пор остается под вопросом происхождение КЛ ПВЭ. Ограничения, накладываемые на мощность источников в рамках известных моделей ускорения, позволяют с уверенностью говорить о том, что это

внегалактические объекты. Но прямая идентификация источников по направлениям прихода частиц возможна только в случае протонов и легких ядер (при условии, что напряженность магнитных полей в межгалактической среде $< 10^{-9}$ Гс). Действительно, ларморовский радиус R_L частицы с зарядом Z для протонов с энергией 10^{20} эВ, движущихся в галактическом магнитном поле с типичной напряженностью ~ 2 μ Гс, составляет ~ 50 кпк, что примерно в два раза больше размера Галактики. Однако для ядер железа $R_L \sim 2$ кпк, поэтому они сильно отклоняются от первоначального направления. Необходимо также учитывать, что при распространении в межгалактической среде частицы КЛПВЭ теряют свою энергию во взаимодействиях с фоновыми излучениями (главным образом, это процессы фоторасщепления ядер и фоторождения пионов протонами). Это приводит к искажению как первоначального состава, так и энергетического спектра частиц, ускоренных в источниках. Таким образом, для того чтобы получить представление о возможных источниках КЛПВЭ, необходимо проводить комплексные расчеты, с учетом процессов взаимодействия частиц КЛ в межгалактической среде и их отклонений в магнитных полях Галактики.

К настоящему времени в физике КЛПВЭ достигнуты определенные успехи: построены гигантские установки High Resolution Fly's Eye (HiRes), Pierre Auger Observatory (Auger) и Telescope Array (TA), разработаны комплексные методы для оценки энергии и массового состава первичных частиц, считается подтвержденным обрезание спектра при энергиях выше ГЗК-порога. Тем не менее между экспериментальными данными существуют расхождения.

Несмотря на огромные площади установок для регистрации КЛПВЭ, понадобятся еще многие годы для того, чтобы набрать значимую статистику событий с энергиями выше ГЗК-порога. Поэтому в настоящее время готовятся новые эксперименты TUS, КЛПВЭ и JEM-EUSO для изучения КЛПВЭ путем регистрации флуоресцентного излучения ШАЛ.

Преимущество таких детекторов заключается в возможности исследования огромных участков земной атмосферы по всей небесной сфере. Предполагается, что установки космического базирования существенно превзойдут по эффективности современные установки Auger и TA.

Цель работы

Целью диссертационной работы является анализ и интерпретация современных экспериментальных данных о космических лучах предельно высоких энергий, полученных гигантскими установками, а также исследование возможности регистрации черенковского света ШАЛ детектором космического базирования.

Основные результаты работы

1. Впервые реализован эффективный численный алгоритм решения задачи о распространении в межгалактической среде ядер КЛ ПВЭ вплоть до железа в диапазоне энергий от $5 \cdot 10^{19}$ эВ до $2 \cdot 10^{20}$ эВ, позволяющий учитывать все существенные каналы реакций фоторасщепления и обеспечивать в ходе расчета сохранение полного числа нуклонов с точностью не хуже 10^{-4} вплоть до максимально исследуемых расстояний (400 Мпк).
2. В рамках модели ускорения частиц, учитывающей их энергетические потери в источнике, получены спектры и массовый состав КЛ ПВЭ у Земли для различных показателей степенных спектров инжекции в источниках. Показано, что противоречивые экспериментальные данные установок High Resolution Fly's Eye и Pierre Auger Observatory можно интерпретировать как обусловленные различием в показателях инжекционных спектров. При этом можно удовлетворительно воспроизвести как спектр, так и массовый состав, наблюдаемые на обеих установках.
3. В рамках «жесткостной» модели ускорения проведен анализ вкла-

дов от источников, находящихся на различных расстояниях, в поток КЛПВЭ у Земли. В результате сравнения с экспериментальными данными показано, что интервал расстояний до наиболее вероятных источников сужается до нескольких десятков мегапарсек.

4. В рамках «жесткостной» модели ускорения, на примере близкого источника – аналога радиогалактики Cen A, подтверждена возможность существования одного или нескольких источников тяжелых ядер, наблюдаемых в Южном полушарии.
5. Впервые получены оценки интенсивности различных составляющих черенковского света, возникающего при развитии ШАЛ над поверхностью океана. С учетом волновой поверхности океана наложены ограничения на зенитные углы ливней, при которых возможна регистрация вспышки отраженных черенковских фотонов детектором космического базирования.

Научная новизна работы

В настоящее время интерес к проблемам энергетического спектра и массового состава КЛПВЭ чрезвычайно возрос. В данной работе был предложен оригинальный подход, состоящий в применении эффективного алгоритма решения задачи о распространении частиц КЛПВЭ в межгалактической среде и ориентирующийся на область энергий выше ГЗК-порога. Сравнительный анализ полученных результатов и данных гигантских установок HiRes и Auger позволил сделать интересный вывод о том, что противоречивые экспериментальные данные можно объяснить различием режимов ускорения в источниках, которые вносят основной вклад в потоки КЛПВЭ, регистрируемые в разных полушариях. Исследование возможности регистрации вспышки черенковских фотонов, отраженных от поверхности океана, установкой космического базирования проведено впервые.

Практическая значимость результатов

Исследования КЛ ПВЭ за ГЗК-порогом проводятся в условиях острого дефицита информации относительно их возможных источников и характера ускорения. Поэтому последовательное рассмотрение достаточно реалистичной модели представляется полезным для решения проблемы происхождения КЛ ПВЭ. Развитие вычислительных методов, позволяющих эффективно и быстро верифицировать справедливость тех или иных гипотез, также является необходимым этапом продвижения к окончательному решению проблемы. Наконец, результаты, относящиеся к исследованию условий возникновения вспышки черенковских фотонов при отражении от поверхности океана, представляют интерес для развития космических проектов по регистрации оптических излучений ШАЛ.

Вклад автора

Автором созданы компьютерные программы расчета распространения протонов и тяжелых ядер в межгалактической среде с учетом их взаимодействий с фоновыми излучениями, генерации и распространения черенковских фотонов в воздухе и воде с учетом отражения на границе раздела в рамках двух моделей волновой поверхности океана и проведены необходимые вычисления. Все публикации подготовлены автором.

Достоверность результатов

Достоверность результатов работы обусловлена использованием современных данных о плотности инфракрасного излучения и сечений, полученных с помощью хорошо апробированных программ TALYS и Geant4, а также тщательным контролем устойчивости созданных численных схем и обеспечением высокой точности расчетов

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на научных семинарах НИИЯФ МГУ и Ломоносовских чтениях 2010 и 2011 гг., а также на конференциях:

- 12th International Conference on Topics in Astroparticle and Under-
ground Physics, 5–9 September 2011, Munich, Germany;
- 15th International Lomonosov Conference on Elementary Particle
Physics, 18–24 August 2011, Moscow;
- International Conference on Advanced Technology and Particle
Physics, 7–8 October 2010, Como, Italy;
- 31^{ая} Всероссийская конференция по космическим лучам, 5–9 июля
2010 г., Москва;
- XVII Международная конференция студентов, аспирантов и моло-
дых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов–2010», 9–13
апреля 2010 г., Москва.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых российских и зарубежных изданиях:

1. О. П. Шустова, Н. Н. Калмыков, Б. А. Хренов «Моделирование рас-
пространения черенковского излучения от ШАЛ над поверхностью
океана» // Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика.
Астрономия, 2011, № 5, С. 63;
2. O. P. Shustova, N. N. Kalmykov, B. A. Khrenov «On the possibility
of registering UHE EAS Cherenkov light by the TUS detector» //
Astroparticle, Particle, Space Physics, Radiation Interaction, Detectors
and Medical Physics Applications, 2011, V. 6, P. 290;
3. О. П. Шустова, Н. Н. Калмыков, Б. А. Хренов «Возможность реги-
страции детектором космического базирования черенковского света
от ШАЛ ультравысокой энергии, проникающего в воду океана» //
Известия РАН. Серия Физическая, 2011, Т. 75, С. 410;

4. О. П. Шустова, Н. Н. Калмыков, А. В. Урысон «Влияние фонового излучения на состав космических лучей предельно высоких энергий при их распространении от источника до установки» // Известия РАН. Серия Физическая, 2011, Т. 75, С. 342;
N. N. Kalmykov, O. P. Shustova, A. V. Uryson «Spectra and mass composition of ultrahigh-energy cosmic rays from point sources» // [arXiv:1112.5523];
5. О. П. Шустова «Возможность регистрации черенковского света от широких атмосферных ливней от частиц предельно высоких энергий детектором космического базирования» // Сборник тезисов XVII Международной конференции «Ломоносов-2010» Секция «Физика», 2010, Т. 1, С. 38.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 98 страницах и включает в себя введение, три главы, заключение, два приложения и список литературы из 124 наименований. Работа содержит 36 рисунков и 5 таблиц.

Содержание работы

Во **введении** дана общая характеристика диссертационной работы: обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, раскрыты научная новизна работы и практическая значимость результатов, перечислены этапы апробации, указана структура диссертации.

В **первой главе** представлен обзор существующих сведений о КЛ ПВЭ. Экспериментальные данные, полученные гигантскими наземными установками HiRes и Auger, носят противоречивый характер. Во-первых, хотя резкое ослабление потока КЛ в области энергий выше ГЗК-порога подтверждается измерениями обеих установок, налицо существенное различие в форме энергетических спектров КЛ ПВЭ. Данные HiRes хорошо аппроксимируются степенными функциями с показателями ~ 2.8 и ~ 5.4

до и после излома при энергии $\sim 5.6 \cdot 10^{19}$ эВ [1]. В то же время результаты Auger показывают, что ослабление потока начинается уже при энергии $\sim 2.9 \cdot 10^{19}$ эВ, а спектр хорошо описывается сглаженной функцией [2]. Еще одно противоречие касается данных о массовом составе КЛ вблизи ГЗК-порога. Согласно измерениям HiRes [3], в составе КЛ с энергиями выше $1.6 \cdot 10^{18}$ эВ преобладают протоны, тогда как данные установки Auger [4] указывают на переход от протонов к тяжелым ядрам. Существуют расхождения и в распределениях направлений прихода событий. В данных Auger при энергиях $> 5.5 \cdot 10^{19}$ эВ [5] найдена значимая корреляция с активными ядрами галактик (АЯГ) из каталога [6] внутри сферы с радиусом ~ 75 Мпк на угловых масштабах 3.1° . Кроме того, обнаружен значимый избыток событий в направлении на радиогалактику Cen A. Напротив, данные HiRes хорошо согласуются с гипотезой об изотропном распределении [7].

Одним из возможных объяснений указанных расхождений является существование одного или нескольких ближних источников тяжелых ядер, которые вносят значительный вклад в поток КЛ ПВЭ, регистрируемый установкой Auger в южном полушарии [8]. В пользу этой гипотезы говорят недавно опубликованные и согласующиеся с результатами HiRes данные установки TA [9], которая, как и HiRes, расположена на территории штата Юта, США. Тем не менее современная статистика событий КЛ ПВЭ не позволяет сделать окончательных выводов. Однако создание наземных установок с площадью бóльшей, чем у Auger, уже невыгодно. На сегодняшний день решением являются космические эксперименты по регистрации флуоресцентного излучения ШАЛ (КЛПВЭ [10], JEM-EUSO [11]), которые существенно увеличат экспозицию за разумный интервал времени наблюдения.

Вторая глава посвящена исследованию, целью которого явилась попытка объяснить различия между данными HiRes и Auger относительно формы энергетического спектра и массового состава, а также определить

возможные режимы ускорения в источниках КЛ ПВЭ. Саму задачу можно сформулировать следующим образом: при заданных параметрах режима ускорения в источниках, их расстояниях и интенсивностях рассчитать энергетический спектр и массовый состав КЛ у Земли в интервале энергий от $5 \cdot 10^{19}$ эВ до $2 \cdot 10^{20}$ эВ и путем сравнения с экспериментальными данными HiRes и Auger определить оптимальные параметры режима ускорения, которые позволяют описать результаты обеих установок.

Основные модельные предположения заключаются в следующем. В качестве источников рассматриваются «ближние» астрофизические объекты – ядра сейфертовских галактик в радиусе ~ 40 Мпк из каталога [6], причем их интенсивность в КЛ, состав и условия ускорения считаются одинаковыми. Такой выбор мотивирован работами [12, 13], где данные объекты были отождествлены как возможные источники КЛ ПВЭ. Кроме того, для них была предложена модель ускорения частиц с учетом энергетических потерь на синхротронное излучение [14, 15]. В расчетах максимальные энергии E_{\max} , до которых ускоряются частицы в источнике, пропорциональны полученным в рамках этой модели значениям, а коэффициент пропорциональности выбирается из условия наилучшего согласия расчетных спектров с экспериментальными данными. Состав частиц в источнике соответствует содержанию элементов в галактической среде, а инжекционные спектры описываются обратным степенным законом с показателями γ_0 и $\gamma_0 + 4$ при энергиях ниже и выше E_{\max} . Поскольку в случае степенного спектра количество частиц с массовым числом A и энергиями из диапазона $(E, E+dE)$ пропорционально A^{γ_0-1} [16], доля тяжелых ядер с заданной энергией в источнике существенно возрастает при достаточно больших значениях γ_0 .

Энергетический спектр и массовый состав частиц, ускоренных в источниках, искажаются в результате взаимодействия с фоновыми излучениями и космическими магнитными полями. Поэтому при интерпретации экспериментальных данных необходимо детальное моделирование

прохождения частиц в межгалактической среде. В интересующем диапазоне энергий важны процессы фоторасщепления ядер и фоторождения пионов протонами при взаимодействиях с реликтовым и инфракрасным фоновым излучениями. Однако для оценки вклада ядер в поток вторичных протонов учитывается также фоторождение пионов ядрами. Следует отметить, что предположение о ближних источниках КЛПВЭ позволяет пренебречь процессом образования электрон-позитронных пар протонами и ядрами. Кроме того, в расчетах не учитывается ослабление потока КЛПВЭ за счет отклонений частиц в магнитных полях.

Приблизительное сохранение Лоренц-фактора в учитываемых процессах позволяет свести задачу о распространении ядер, ускоренных в источнике, к решению цепочки дифференциальных уравнений для вторичных ядер. В целом рассматривается свыше 100 изотопов. Уравнение, описывающее эволюцию ядра с зарядом Z и массовым числом A , имеет вид:

$$\frac{dN_Z^A}{dx} = -N_Z^A(x) \lambda_{(A,Z)}^{\text{tot}} + \sum_{k,l} N_{Z+l}^{A+k}(x) \sum_m \lambda_{(A+k,Z+l)}^m + N_{Z+1}^A(x) \lambda_{(A,Z+1)}^{\beta^+} + N_{Z-1}^A(x) \lambda_{(A,Z-1)}^{\beta^-} + \sum_{n=0,1} N_{Z+n}^{A+1}(x) \frac{\lambda_{(A+1,Z+n)}^\pi}{2},$$

где λ^i – обратная средняя длина свободного пробега для i -го канала реакции (фоторасщепление с испусканием одного или нескольких нуклонов, α -частиц и т.д., β -распад и фоторождение пиона), а λ^{tot} – обратная полная длина свободного пробега. Программа расчета позволяет учесть все значимые каналы реакций фоторасщепления.

При вычислении спектров ядра объединяются в группы в зависимости от их массового числа. Это группа гелия He, а также группы легких L, средних M, тяжелых H и сверхтяжелых VH ядер.

Результаты расчета показывают (см. рис. 1), что в рамках принятых модельных предположений можно получить хорошее согласие с аппроксимациями спектров обеих установок, причем единственным парамет-

ром является показатель инжекционного спектра: $\gamma_0 = 2.2$ (HiRes) и 4.3 (Auger).

Вследствие недостаточной статистики событий КЛ ПВЭ массовый состав измерен только до ГЗК-порога. Поэтому при сравнении предполагается, что резкого изменения состава в области более высоких энергий не происходит. На рис. 3 представлен средний логарифм массового числа частиц, соответствующего спектру на рис. 1. Здесь же указаны значения $\langle \ln A \rangle$, извлеченные из данных о средней глубине максимума ливней $\langle X_{\max} \rangle$ при самой высокой энергии E_c ($\sim 5 \cdot 10^{19}$ эВ для HiRes [3], $\sim 3.5 \cdot 10^{19}$ эВ для Auger [4]) путем интерполяции между предсказаниями моделей адронных взаимодействий EPOSv1.99 и QGSJET01 для «протонного» и «железного» составов. Данные модели дают экстремальные предсказания. Вообще, интерпретация массового состава сильно зависит от выбранной модели взаимодействия. Тем не менее очевидно, что вблизи ГЗК-порога массовый состав, измеренный HiRes, является более легким, поэтому результаты расчета качественно согласуются с данными обеих установок.

Энергетические спектры и массовый состав КЛ ПВЭ от источников, равномерно распределенных в слое от 1 до 40 Мпк, также согласуются с данными обеих установок (см. рис. 2, 3). Это свидетельствует о том, что полученные результаты не слишком чувствительны к распределению ближних источников.

В данной главе также исследуется вопрос о расстояниях до возможных источников КЛ ПВЭ. При этом рассматривается равномерное распределение источников, а максимальные энергии ядер определяются в рамках «жесткостной» модели ускорения. Расчеты средних расстояний, с которых группы ядер могут достигнуть нашей Галактики, показывают, что источники КЛ ПВЭ должны находиться в пределах нескольких десятков мегаларсек. Сравнение спектров от источников, расположенных в пределах 40, 100 и 400 Мпк, с экспериментальными данными также

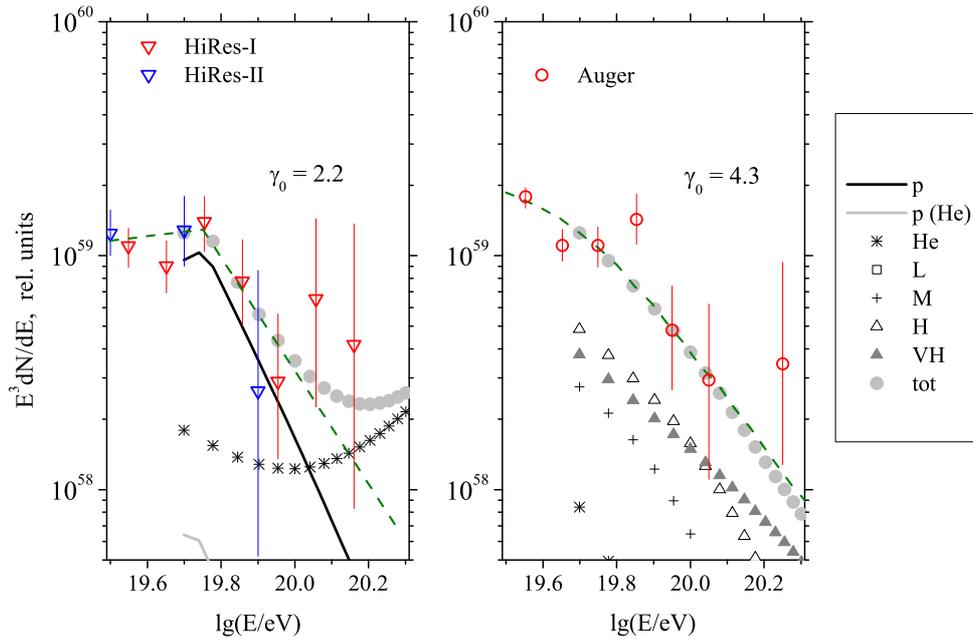


Рис. 1 – Дифференциальные спектры групп ядер от ближних источников при $\gamma_0 = 2.2$ (слева) и 4.3 (справа). p (He) – поток вторичных протонов, образованных ядрами гелия. Полный спектр, представленный серыми кружками, нормирован на единицу при $5 \cdot 10^{19}$ эВ. Экспериментальные точки установок HiRes и Auger, а также их аппроксимации (штриховые линии) показаны на графиках слева и справа, соответственно.

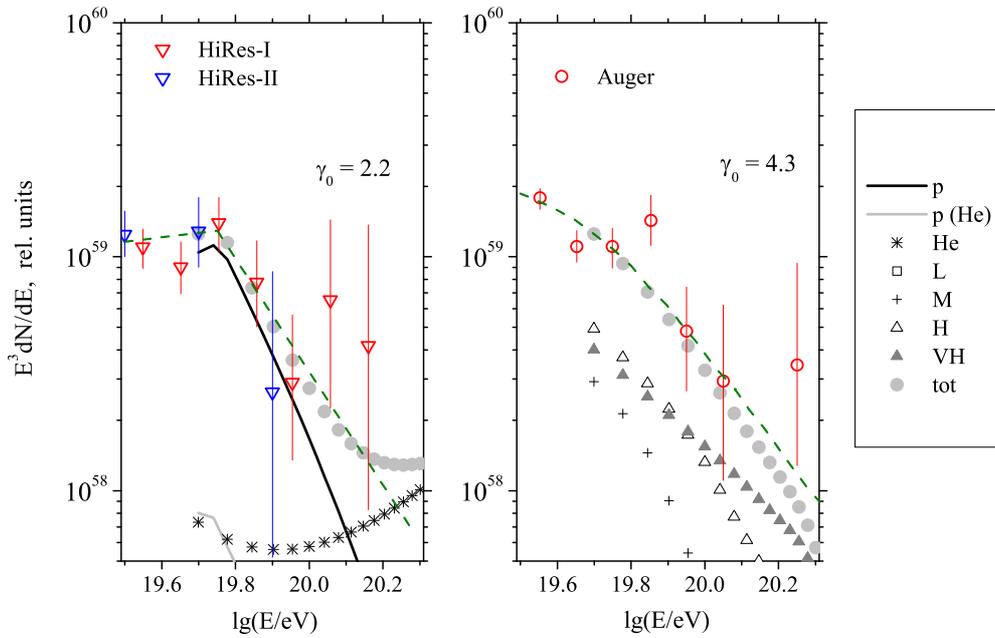


Рис. 2 – Дифференциальные спектры групп ядер от источников, равномерно распределенных в слое от 1 Мпк до 40 Мпк, при $\gamma_0 = 2.2$ (слева) и 4.3 (справа). См. пояснение к рис. 1.

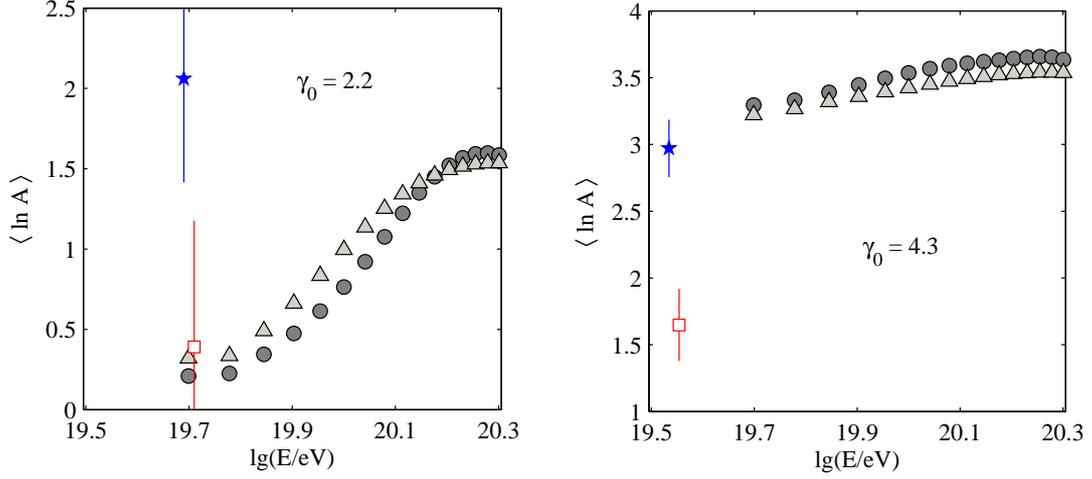


Рис. 3 – Энергетическая зависимость среднего логарифма массового числа частиц, соответствующего спектрам на рис. 1 (светло-серые треугольники) и 2 (темно-серые кружки). Для сравнения представлены результаты, извлеченные из данных HiRes (слева) и Auger (справа) о величине $\langle X_{\max} \rangle$ при энергии E_c ; точки, определенные из предсказаний моделей EPOSv1.99 (звездочки) и QGSJET01 (квадратики), смещены в противоположные стороны относительно E_c на $\Delta \lg E = 0.01$.

демонстрирует, что ослабление потока от далеких источников наступает слишком быстро. Следует подчеркнуть, что использование двух разных моделей ускорения дает качественно одинаковые результаты, а именно, для объяснения данных установок HiRes и Auger требуются различные значения инжекционного индекса.

Сама по себе интерпретация противоречивого характера результатов измерений как обусловленного сменой режимов ускорения кажется несколько странной, поскольку приводит к фундаментальному различию между источниками, находящимися в поле зрения каждой установки. Более естественным является предположение о том, что один или несколько внегалактических объектов в поле зрения установки Auger являются источниками тяжелых ядер и дают существенный вклад в регистрируемый поток КЛ [8]. В данной главе эта гипотеза рассматривается по отношению к мощной радиогалактике Cen A, которая широко обсуждается как возможный источник КЛ ПВЭ (см., например, [17, 18]). Спектр, полученный при условии, что источник на расстоянии ~ 4 Мпк (аналог Cen A) с инжекционным индексом $\gamma_0 = 4.6$, с одной стороны, и остальные АЯГ

из каталога [6] в радиусе 40 Мпк с $\gamma_0 = 2.2$, с другой, дают приблизительно одинаковые вклады в поток КЛПВЭ, хорошо согласуется с гладкой аппроксимацией Auger.

В **третьей главе** представлены оценки различных компонент черенковского света, возникающих при развитии ливня над поверхностью океана и направленных в верхнюю полусферу, и результаты исследования условий, при которых окажется возможной регистрация детектором ТУС вспышки черенковских фотонов ШАЛ, отраженных от волновой поверхности океана.

В ближайшее время планируется осуществление космического эксперимента ТУС [10, 19], нацеленного на исследование КЛПВЭ путем регистрации флуоресцентного излучения, возникающего при прохождении ШАЛ. Это излучение изотропно, что позволяет регистрировать фотоны, идущие под произвольными углами к оси ливня. Одно из преимуществ такого эксперимента состоит в возможности проводить поиск событий КЛПВЭ по всей небесной сфере одним детектором.

Помимо флуоресценции ШАЛ сопровождается мощным потоком черенковского излучения, которое концентрируется в основном вдоль оси ливня. Тем не менее при прохождении ШАЛ над поверхностью с высоким альбедо отраженные черенковские фотоны можно регистрировать на больших высотах. Наилучшие условия для такой регистрации возникают при отражении от снега (нормальное альбедо чистого снега достигает $\sim 90\%$). Еще в 1971 г. Чудаков указал на возможность регистрировать ШАЛ по черенковскому свету, отраженному от заснеженной поверхности [20]. Данный метод положен в основу успешно развивающегося эксперимента СФЕРА-2 [21].

Однако для установок космического базирования особый интерес представляет возможность регистрации черенковского света, отраженного от водной поверхности, поскольку $\sim 70\%$ земного шара покрыто водой. Хотя нормальное альбедо воды составляет всего $\sim 2\%$, поток черенковских

фотонов ШАЛ примерно в пять раз больше флуоресцентного потока, поэтому данная проблема является весьма актуальной в преддверии запуска детектора ТУС. Регистрация вспышки черенковских фотонов в конце флуоресцентного трека существенно повысила бы надежность экспериментальных данных, позволив уточнить траекторию ливня.

В потоке черенковского света, возникающего при развитии ШАЛ над водной поверхностью, можно условно выделить несколько компонент, направленных в верхнюю полусферу. Часть черенковских фотонов идет вверх в результате рассеяния в атмосфере, хотя значительно большая доля излучения достигает поверхности океана. При этом часть фотонов отражается и также идет в верхнюю полусферу, а остальные фотоны входят в воду. Однако вследствие рассеяния в воде некоторая доля фотонов выходит на поверхность. Кроме того, остаток ливня, имеющий энергию порядка десятков процентов от первичной, при попадании в воду генерирует большое число черенковских фотонов, часть из которых также выходит на поверхность воды. Для будущих космических проектов расчет указанных компонент может оказаться полезным. Например, предполагается, что рассеянные черенковские фотоны будут создавать существенный «шум», величину которого необходимо знать для выделения флуоресцентного сигнала.

Генерация фотонов и их распространение в среде моделировались методом Монте-Карло. В табл. 1 при различных значениях длины волны фотона λ и зенитного угла ливня θ_{sh} представлены: W_{refl} – доля фотонов, отраженных от поверхности воды; W_{back} – доля рассеянных в воздухе фотонов, которые достигли высоты 400 км; $W_{\text{a-w}}$ – доля фотонов, попавших в воду и вышедших в результате рассеяния на поверхность; W_{wat} – доля фотонов, образованных в воде остатком ливня и вышедших на поверхность раздела в результате рассеяния. Расчеты для W_{refl} , $W_{\text{a-w}}$, W_{wat} выполнены в модели абсолютно гладкой границы раздела сред.

При наблюдениях на больших высотах важную роль играет угловое

θ_{sh}	λ , нм	$N_{\lambda}^{air}/10^{13}$ нм ⁻¹	W_{refl} %	W_{back} %	W_{a-w} %	$N_{\lambda}^{wat}/10^{12}$ нм ⁻¹	W_{wat} %
0°	300	5.44	1.6	1.4	0.02	26.1	0.2
	340	4.24	1.6	1.3	0.03	20.4	0.3
	390	3.22	1.6	1.0	0.05	15.5	0.4
30°	300	6.43	1.7	1.8	0.02	12.6	0.3
	340	5.00	1.7	1.6	0.04	9.83	0.4
	390	3.81	1.7	1.3	0.06	7.47	0.4
45°	300	7.11	1.9	2.5	0.02	2.81	0.5
	340	5.54	2.1	2.4	0.04	2.20	0.6
	390	4.21	2.2	1.9	0.06	1.67	0.7
60°	300	7.20	2.5	4.0	0.02	0.02	0.9
	340	5.60	3.3	4.1	0.03	0.01	1.0
	390	4.26	3.9	3.4	0.06	0.01	1.2

Таблица 1 – Вклады компонент черенковского излучения, возникающих при развитии ливня над поверхностью океана и направленных в верхнюю полусферу (см. пояснение в тексте). Также представлено число черенковских фотонов N_{λ}^{air} (N_{λ}^{wat}), образованных в воздухе (воде), по отношению к которому получены доли W_{refl} , W_{back} , W_{a-w} (W_{wat}).

распределение фотонов, поэтому необходим учет волн на поверхности океана. В настоящей работе рассматриваются две модели волновой поверхности океана: 1) периодической структуры и 2) хаотической структуры. В первой модели поверхность представляется в виде неподвижной волны с длиной λ_w и амплитудой h_w вдоль оси Ox , форма которой описывается параметрическими уравнениями укороченной циклоиды. Во второй модели поверхность разбивается на множество мелких плоских ячеек высотой η . Величины $\eta_u = \partial\eta/\partial x$, $\eta_c = \partial\eta/\partial y$ (индексы «u» и «c» указывают на направление по ветру и поперек) следуют двумерному нормальному распределению с дисперсиями $\sigma_u^2 = 3.16 \cdot 10^{-3} u_w$, $\sigma_c^2 = 1.92 \cdot 10^{-3} u_w$, где u_w – скорость ветра в м/с [22]. В обеих моделях предполагается, что на границе раздела фотоны отражаются и преломляются согласно законам геометрической оптики. Принятые значения параметров волновой поверхности океана воспроизводят усредненную картину, наблюдаемую в спокойную погоду, что должно благоприятствовать регистрации ШАЛ

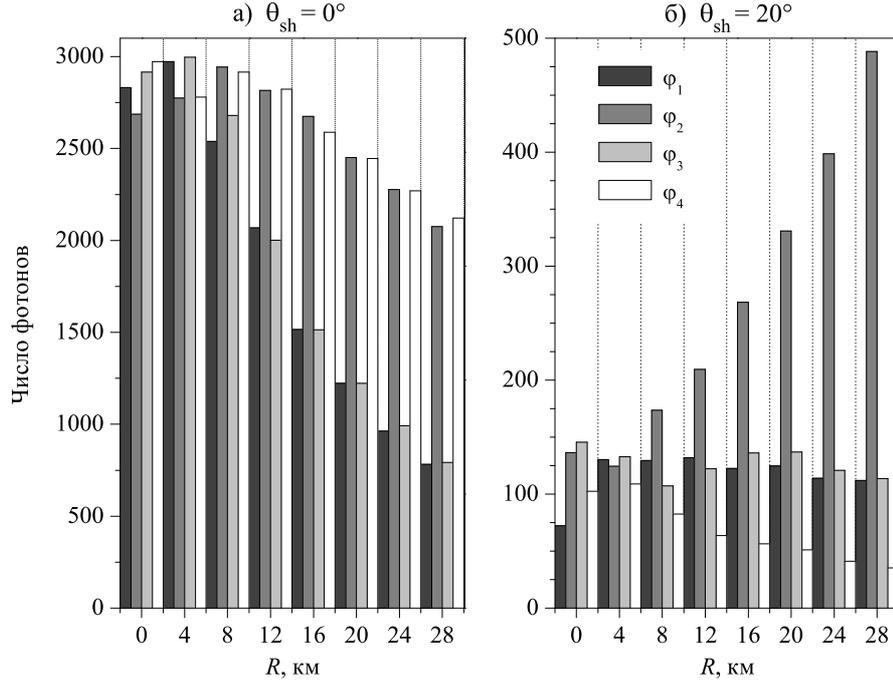


Рис. 4 – Число отраженных черенковских фотонов, которые попадают на зеркало детектора в зависимости от величины R , для ливней с зенитными углами $\theta_{sh} = 0^\circ$ (а) и 20° (б). Каждое кольцо разбивается на 4 равных сегмента, в зависимости от азимутального угла фотонов: $\varphi_1 = 45^\circ - 135^\circ$, $\varphi_2 = 135^\circ - 225^\circ$, $\varphi_3 = 225^\circ - 315^\circ$, $\varphi_4 = 315^\circ - 45^\circ$.

из космоса.

Основным параметром, определяющим возможность регистрации вспышки отраженных черенковских фотонов, является зенитный угол ливня. Кроме того, важно учитывать расположение детектора относительно оси ливня. На рис. 4 представлено число фотонов, которые попадают на зеркало детектора ТУС в зависимости от величины R в случае ливней с зенитными углами $\theta_{sh} = 0^\circ$ и 20° в модели периодической структуры (R соответствует радиусу круга на высоте 400 км с центром в проекции точки пересечения осью ливня гладкой поверхности океана). Как видно, наблюдается также зависимость от азимутального угла фотона φ , поскольку в модели периодической структуры угловое распределение отраженных фотонов имеет «выбросы» поперек фронта волны. Учитывая временное разрешение детектора ТУС (~ 1 мкс), можно считать, что все отраженные черенковские фотоны будут регистрироваться одновременно.

В рамках модели периодической структуры волновой поверхности океана с параметрами волны $h_w = 0.7$ м, $\lambda_w = 40$ м показано, что регистрация вспышки отраженных фотонов в конце флуоресцентного трека возможна в ливнях с зенитными углами $\lesssim 20^\circ$. Анализ, выполненный в модели хаотической структуры при скорости ветра $u_w = 6$ м/с, дает ограничение $\theta_{sh} \lesssim 25^\circ$.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

Цитируемая литература

- [1] P. Sokolsky (The High Resolution Fly's Eye Collaboration) «Observation of the GZK cutoff by the HiRes Experiment» // Nuclear Physics B Proceedings Supplements, 2009, V. 196, P. 67.
- [2] J. Abraham et al. (The Pierre Auger Collaboration) «Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory» // Physics Letters B, 2010, V. 685, P. 239 [arXiv:1002.1975].
- [3] R. U. Abbasi et al. (The HiRes Collaboration) «Indications of proton-dominated cosmic-ray composition above 1.6 EeV» // Physical Review Letters, 2010, V. 104, P. 161101 [arXiv:0910.4184].
- [4] J. Abraham et al. (The Pierre Auger Collaboration) «Measurement of the depth of maximum of extensive air showers above 10^{18} eV» // Physical Review Letters, 2010, V. 104, P. 091101 [arXiv:1002.0699].
- [5] P. Abreu et al. (The Pierre Auger Collaboration) «Update on the correlation of the highest energy cosmic rays with nearby extragalactic matter» // Astroparticle Physics, 2010, V. 34, P. 314 [arXiv:1009.1855].
- [6] M.-P. Véron-Cetty, P. Véron «A catalogue of quasars and active nuclei: 12th edition» // Astronomy and Astrophysics, 2006, V. 455, P. 773.

- [7] R. U. Abbasi et al. (The High Resolution Fly's Eye Collaboration) «Search for correlations between HiRes stereo events and active galactic nuclei» // *Astroparticle Physics*, 2008, V. 30, P. 175 [arXiv:0804.0382].
- [8] B. Schwarzschild «The highest-energy cosmic rays may be iron nuclei» // *Physics Today*, 2010, May, P. 15.
- [9] Y. Tsunesada (The Telescope Array Collaboration) «Highlights from Telescope Array» // *Proceedings of the 32nd International Cosmic Ray Conference*, August 2011, Beijing, China [arXiv:1111.2507].
- [10] B. A. Khrenov et al. «KLYPVE/TUS space experiments for study of ultrahigh-energy cosmic rays» // *Physics of Atomic Nuclei*, 2004, V. 67, P. 2058.
- [11] Y. Takahashi (The JEM-EUSO Collaboration) «The JEM-EUSO mission» // *New Journal of Physics*, 2009, V. 11, P. 065009 [arXiv:0910.4187].
- [12] A. V. Uryson «Possible sources of ultrahigh-energy cosmic protons» // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1996, V. 64, P. 77.
- [13] A. V. Uryson «Identification of sources of ultrahigh energy cosmic rays» // *Astronomical Reports*, 2001, V. 45, P. 591.
- [14] A. V. Uryson «Ultrahigh energy cosmic ray acceleration in Seyfert galactic nuclei» // *Astronomy Letters*, 2001, V. 27, P. 775.
- [15] A. V. Uryson «Seyfert nuclei as sources of ultrahigh-energy cosmic rays» // *Astronomical Reports*, 2004, V. 48, P. 81.
- [16] V. L. Ginzburg, S. I. Syrovatskii «The origin of cosmic rays» // Pergamon Press, Oxford, 1964.

- [17] D. S. Gorbunov, P. G. Tinyakov, I. I. Tkachev, S. V. Troitsky «On the interpretation of the cosmic-ray anisotropy at ultra-high energies» // [arXiv:0804.1088].
- [18] T. Piran «A new limit on the distances of nuclei UHECRs sources» // [arXiv:1005.3311].
- [19] V. Abrashkin et al. «Space detector TUS for extreme energy cosmic ray study» // Nuclear Physics B Proceedings Supplements, 2007, V. 166, P. 68.
- [20] А. Е. Чудаков «Возможный метод регистрации ШАЛ по черенковскому излучению, отраженному от заснеженной поверхности Земли» // Материалы Всесоюзного симпозиума «Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий», 1972, Якутск, С. 69.
- [21] R. A. Antonov et al. «Antarctic balloon-borne detector of high-energy cosmic rays (SPHERE project)» // Radiation Physics and Chemistry, 2006, V. 75, P. 887.
- [22] C. D. Mobley «Light and water: radiative transfer in natural waters» // London, Academic Press, 1994.