

ПРОЕКТ ОЛВЭ (ОБСЕРВАТОРИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ): ЗАДАЧИ И ПРОЕКТНЫЙ ОБЛИК

© 2024 г. Д. М. Подорожный^{1)*}, Д. Е. Карманов¹⁾, И. М. Ковалев¹⁾, А. А. Курганов¹⁾, А. Д. Панов¹⁾,
А. Н. Турундаевский¹⁾

Поступила в редакцию 19.10.2023 г.; после доработки 19.10.2023 г.; принята к публикации 19.10.2023 г.

Обсерватория космических лучей высоких энергий (ОЛВЭ) — это проект эксперимента для прямого изучения космических лучей, основанный на использовании сверхтяжелого ионизационного калориметра. Эффективный геометрический фактор установки составит величину не менее $12 \text{ м}^2 \text{ ср}$ для протонов космических лучей и не менее $16\text{--}20 \text{ м}^2 \text{ ср}$ для ядер и электронов. В течение 5–7 лет экспозиции эта миссия позволит измерить энергетические спектры всех распространенных и редких ядер космических лучей в области энергий $10^{12}\text{--}10^{16}$ эВ/частица с поэлементным разрешением заряда ядер и с достаточно высоким энергетическим разрешением. В эксперименте ОЛВЭ планируется исследование не только диапазона зарядов ядер космических лучей $Z = 1 - 26$, но и детектирование сверхтяжелых ядер за пиком железа, а также высокоэнергичных электронов, позитронов и гамма-квантов. Обсуждаются основные задачи, проектный облик и характеристики космической миссии.

DOI: 10.31857/S0044002724030032, EDN: IXKALF

1. ВВЕДЕНИЕ

В астрофизике широко признается, что космические лучи (КЛ) несут в себе информацию об основных источниках КЛ (ускорителях), среди которых наиболее важными являются сверхновые звезды, и о характеристиках межзвездной среды — мира, в котором мы живем. Результаты этих исследований — необходимый фактический материал для построения моделей Галактики, в том числе моделей ее энергетического баланса. В практическом аспекте информация о химическом составе и энергетических спектрах КЛ необходима для оценки радиационной обстановки в космосе и на поверхности планет, лишенных плотной атмосферы. Это имеет практическое значение для освоения космического пространства и планет Солнечной системы. КЛ также дают возможность для целенаправленного поиска некоторых экзотических явлений, которые могут дать, например, информацию о параметрах частиц темной материи или свидетельства в пользу существования частиц странной материи. Наиболее актуальными задачами физики космических лучей в настоящее время являются определение химического состава обильных (по современным представлениям, рожденных в источниках) ядер КЛ с максимально возможным продвижением вверх по энергетической шкале и изучение зарядового и изотопного состава сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа. Обе эти компоненты КЛ рождены в наиболее

катастрофических процессах Галактики и именно по ним строятся современные модели КЛ.

Изучение спектров электронов и позитронов крайне важно с точки зрения исследования близких источников КЛ и для поиска возможных параметров взаимодействия (аннигиляция, распад) частиц темной материи. Информация об этом может быть получена с использованием особенностей энергетических спектров лептонной компоненты КЛ. Главная трудность в исследованиях КЛ состоит в их круто падающих (по степенному закону) энергетических спектрах, что приводит к очень быстрому уменьшению потоков КЛ с ростом их энергии. Для получения спектров энергии КЛ при сверхвысоких энергиях с поэлементным разрешением по заряду ядер требуется вынос за пределы атмосферы аппаратуры с весьма значительными габаритами и массой.

2. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ МИССИИ ОЛВЭ

По-прежнему одной из основных задач в исследованиях КЛ остается задача астрофизической интерпретации феномена “колена” Христиансена–Куликова, которое представляет собой резкий излом в энергетическом спектре всех частиц с показателе степенного спектра ~ 2.7 до значения ~ 3.2 вблизи энергии $\sim 3 \times 10^{15}$ эВ/частицу [1]. Убедительного объяснения этого явления пока не существует, и эта задача ждет своего решения уже более шестидесяти лет. Ключом к решению данной проблемы может послужить статистически обеспеченное детальное определение химического состава КЛ в данной области.

¹⁾ Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

* E-mail: dmpo@bk.ru

Долгое время, начиная с основополагающей монографии [1], в которой был предложен основной механизм ускорения КЛ в оболочках сверхновых, который приводил к универсальному степенному поведению энергетического спектра, предполагалось, что спектры ядер КЛ от 10^{12} эВ/частицу до “колена” имеют приблизительно одинаковый степенной характер. В многочисленных работах, уточняющих этот процесс с учетом структуры Галактики, например [2–6], принималась “стандартная модель” физики КЛ, в которой, исходя из парадигмы множества источников КЛ в Галактике и универсальности их степенных спектров, наблюдаемые спектры КЛ должны иметь показатель, близкий к 2.7. Разброс в полученных немногочисленных экспериментальных результатах с 60-х гг. 20 в. до его конца объяснялся недостаточной статистической обеспеченностью данных и укладывался в ошибки экспериментов.

Эксперименты нового поколения 21 в. ATIC [7], PAMELA [8], AMS-02 [9], НУКЛОН [10], CREAM [11], CALET [12], DAMPE [13] получили ряд статистически обеспеченных данных об особенностях в химическом составе и энергетических спектрах КЛ в области энергий от 3×10^{10} эВ/частица до примерно 10^{14} эВ/частица, т.е. при энергиях существенно ниже “колена” Христиансена–Куликова. Не вдаваясь в детали (этот материал достаточно подробно представлен в обзоре [14]), можно отметить, что сделанные в последнее время открытия не вписываются в “стандартную модель” КЛ, и начата работа по поиску их астрофизического объяснения. Остро не хватает экспериментальных данных с высокой методологической и статистической достоверностью. Очевидно, и есть тому указания [14], в спектрах КЛ могут обнаружиться новые особенности при энергиях выше 10^{14} эВ/частица вплоть до “колена”, а полученные данные до 10^{14} эВ/частица нуждаются в уточнении по тонкой структуре каждого элемента КЛ, включая редкие ядра. Непонятным остается химический состав КЛ, а следовательно, и природа КЛ после “колена” [15]. Таким образом, необходимо радикальное увеличение имеющегося банка данных событий, прямых экспериментов по исследованию КЛ, приблизительно на два порядка, и продвижение энергетического диапазона вверх вплоть до энергий масштаба 10^{16} эВ/частица. По опыту авторов, для надежной реконструкции исходных спектров КЛ с использованием процедуры решения обратной задачи, энергетическая точность для всех элементов КЛ в энергетическом диапазоне 10^{15} – 10^{16} эВ/частица не должна быть меньше 30%, при этом должно быть детектировано не менее 100 событий частиц КЛ с энергией выше 10^{16} эВ/частица для каждого ядра, для которого реконструируется спектр в этой области. В области энергий 10^{12} – 10^{15} эВ/частица энергетическая точность может составлять от нескольких процентов до 20%, в зависимости от типа частиц и энергий с до-

статочной статистической обеспеченностью. Зарядовое разрешение не должно быть хуже 0.2 зарядовой единицы в области ядер CNO во всем энергетическом диапазоне. При наличии такого банка событий возможна существенная, надежно подтвержденная, корректировка “стандартной модели” физики КЛ. Создание такого банка событий есть центральная задача космического эксперимента ОЛВЭ.

Знания о Галактике остаются неполными без изучения второй важнейшей компоненты КЛ — сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа. Данные по зарядовому составу сверхтяжелых ядер КЛ дают информацию о галактическом нуклеосинтезе в современную космологическую эпоху и определяют параметры космического пространства в ближней области Галактики (в масштабе килопарсека). Основные данные об элементном составе сверхтяжелых ядер КЛ изучались в экспериментах: HEAO-3-C3 [16], SuperTiger [17], LDEF [18], ACE-CRIS [19]. Эксперимент HEAO-3-C3 (черенковские счетчики и ионизационные камеры) с экспозицией ~ 6 м² ср год дал наиболее полный результат о зарядовом составе от $Z = 26$ до $Z = 69$. Эти данные были повторены, с несколько меньшей статистикой, экспериментом SuperTIGER (сцинтилляционный трекер и черенковские счетчики), экспозиция ~ 0.6 м² ср год. Эксперимент LDEF (твердотельный трековый детектор) был нацелен на регистрацию субактинидов ($70 \leq Z \leq 87$) и актинидов ($88 \leq Z \leq 103$). Благодаря огромной экспозиции, примерно ~ 170 м² ср год, было зарегистрировано несколько сотен ядер субактинидов и 35 ядер актинидов до заряда $Z = 96$ включительно, для которого было зарегистрировано единичное событие. Изотопный состав тяжелых ядер КЛ был определен лишь в эксперименте ACE-CRIS (сцинтилляционный трекер, кремниевый калориметр) до значений $Z = 32$. Полученные в перечисленных экспериментах результаты дали указания на существенные особенности в зарядовом составе тяжелых КЛ, которые не вписываются в простейшие модели источников КЛ, и дают заметные отличия от химического состава Солнца (более подробно см. в обзоре [14]). Как и в ситуации с высокими и сверхвысокими энергиями обильных ядер до железа, в данных о зарядовом составе сверхтяжелых ядер остро не хватает статистики. Дополнительной задачей космического эксперимента ОЛВЭ должно быть использование всего объема научной аппаратуры в целях исследования тяжелых и сверхтяжелых ядер КЛ. При указанном выше требовании к фактору экспозиции, в этом случае статистка ядер в области за железом будет увеличена на полтора-два порядка, а результаты эксперимента LDEF будут, как минимум, повторены при более высоком зарядовом разрешении. При некоторой доработке, используя задел проекта НУКЛОН 2 [20], возможно увеличение более, чем на порядок данных по изотопному составу тяжелых ядер КЛ.

Лептонная составляющая КЛ представлена смесью электронов и позитронов. Эти частицы КЛ, исходя из их малой массы, интенсивно теряют энергию при синхротронном излучении в межзвездных магнитных полях и на обратном комптоновском рассеянии на микроволновом фоне и квантах оптического и ультрафиолетового излучения. Поэтому их энергетические спектры (показатель степени и возможные особенности) несут в себе информацию об окружающей среде Солнца, по современным представлениям [21], в масштабе одного килопарсека. Последние эксперименты: ATIC [22], PAMELA [23], Fermi [24], AMS-02 [25], DAMPE [26], CALET [27] дали информацию о суммарном спектре электронов и позитронов в области энергий от 10^9 до 3×10^{12} эВ. Во всех экспериментах показатель спектра имеет существенно нестепенной вид, начиная с энергии больше 10^{10} эВ (более подробно в обзоре [14]). В области предельно зарегистрированных энергий, при энергиях больше 3×10^{11} эВ, где высоки статистические ошибки, наблюдается заметное различие между данными разных экспериментов. Эксперимент ATIC в области энергий (10^{11} – 8×10^{11} эВ) дал указания на существование тонкой структуры спектра [28]. Сенсацией был эксцесс в потоке позитронов, обнаруженный в эксперименте PAMELA [29] при энергиях больше $\sim 10^{10}$ эВ, когда был обнаружен резкий рост отношения $e^+/(e^+ + e^-)$ вместо ожидаемого падения отношения. Эксперименты AMS-02 [25] и Fermi [24] этот феномен подтвердили, а AMS-02 дал указания на начало спада этого роста соотношения в области энергий $\sim 2 \times 10^{11}$ эВ. Видно, что для спектра электронов и позитронов, начиная с энергии примерно 10^{11} эВ, остро не хватает данных. Исходя из требований к аппаратуре ОЛВЭ в задаче по регистрации обильных ядер высокой энергии, статистика по событиям электронов и позитронов по сравнению с существующими экспериментами должна быть увеличена приблизительно на полтора порядка. В аппаратуре ОЛВЭ не предусмотрено использования масс-спектрометра по определению знака заряда для выделения позитронной компоненты. Однако можно воспользоваться методикой, примененной в эксперименте Fermi [24], где использовалась анизотропия потока заряженных частиц в магнитном поле Земли. Детали такой методики могут быть определены, когда станут точно известны параметры орбиты космического аппарата ОЛВЭ и габаритные размеры аппаратуры.

Методика выделения из высокоэнергичного космического излучения компоненты гамма-квантов близка к методике выделения электронно-позитронной компоненты. Основную роль здесь играют различия в поперечном и продольном развитии каскада в калориметре для сильно взаимодействующих частиц и частиц только с электромагнитным взаимодействием, а критерием отбора гамма-квантов из фона электронов и позитронов является отсут-

ствие заряда. Однако без существенной доработки аппаратуры, которая нереальна при значительных габаритах спектрометра ОЛВЭ, ожидаемые характеристики не позволяют квалифицировать ОЛВЭ как полноценный гамма-телескоп. Применение методики ионизационного калориметра (ИК) дает ожидаемый нижний энергетический порог для гамма-квантов масштаба 2×10^{11} эВ и не может обеспечить угловое разрешение выше одного градуса, что для полноценного гамма-телескопа недостаточно.

3. ПРОЕКТНЫЙ ОБЛИК ОЛВЭ

3.1. Концепции построения Обсерватории лучей высокой энергии, ОЛВЭ

1. Основным принципом проекта ОЛВЭ является требование к высокому значению фактора экспозиции, который должен превышать на полтора–два порядка таковой у всех проведенных и запланированных экспериментов.

2. Высокий фактор экспозиции должен сочетаться с высокой точностью в измерениях, необходимой для построения спектров редких компонент и поиском тонкой структуры различных энергетических спектров КЛ.

3. Для прямой регистрации частиц КЛ необходимо иметь в составе научной аппаратуры как минимум две регистрирующие системы: систему измерения энергии (спектрометр) и систему измерения заряда (либо регистрации его отсутствия). В качестве спектрометра для столь беспрецедентно широкого диапазона высоких и сверхвысоких энергий может быть использована лишь методика ионизационного калориметра (ИК) [30]. Это традиционная и хорошо изученная методика, основанная на измерении каскада вторичных частиц, рожденных в веществе (поглотителе) ИК. Точность в измерениях ИК в первую очередь зависит от глубины ИК, поэтому для космических экспериментов главная трудность его использования — значительная масса прибора. Для измерения заряда предложена многослойная кремниевая матрица детекторов — методика, которая успешно была применена в ряде космических экспериментов (например, [7, 8, 10]).

4. Построение комплекса научной аппаратуры ОЛВЭ осуществляется с использованием и дальнейшим развитием новейших технологий экспериментальной физики высоких энергий, которые получили апробацию в космических экспериментах.

5. Решающим фактором успешной реализации астрофизического эксперимента ОЛВЭ является использование ракеты-носителя тяжелого (сверхтяжелого) класса, минимально допустимая масса космического аппарата ОЛВЭ должна составлять 16 т, в этом случае масса научной аппаратуры может достигнуть 12 т.

6. В космическом комплексе ОЛВЭ, кроме массы, нет особых требований к космическому аппарату

и орбите. Все служебные системы комплекса должны быть адаптированы к существующим системам ответственных серийных космических аппаратов и наземной инфраструктуры.

3.2. Ионизационный калориметр ОЛВЭ

Для регистрации ядерной компоненты КЛ оптимальным веществом поглотителя ИК может служить вещество со средним значением плотности, например железо с плотностью $\rho = 7.8 \text{ г/см}^3$. Именно так было сделано в гетерогенном ИК (железо, полистирол) в эксперименте СОКОЛ [31]. Таким хорошим выбором является тяжелый сцинтиллятор, например, гомогенный, полностью активный ИК из ВГО (кристалл германата висмута), $\rho = 7.1 \text{ г/см}^3$, как в эксперименте АТИС [22]. В этом случае идет одновременное эффективное развитие как адронной, так и электромагнитной частей каскада. Для регистрации лептонной компоненты оптимально использовать тяжелый поглотитель (свинец, вольфрам) в целях наиболее эффективного развития электромагнитного каскада. Для объединения этих требований, после математического моделирования [32] в качестве поглотителя для ИК ОЛВЭ было выбрано сочетание очень легкого активного вещества — сцинтиллятора из полистирола, $\rho = 1.0 \text{ г/см}^3$, и очень тяжелого поглотителя из вольфрамо-медно-никелевого сплава, $\rho = 16.2 \text{ г/см}^3$. Опыт использования этого материала в эксперименте НУКЛОН показал его высокую механическую прочность и достаточную пластичность для создания каркаса ИК. Оптимальной формой (с учетом технологичности при создании) после широкомасштабного моделирования была выбрана форма ИК в виде шестиугольной призмы. Внутренняя структура ИК должна обеспечивать обзор в телесном угле 4π и определять форму каскада с требуемой точностью для выделения лептонной компоненты из фона протонов, а также допускать реконструкцию начальной траектории частицы с точностью, достаточной для надежной селекции сигнала первичной частицы в кремниевой матрице, используемой для определения заряда. Для удовлетворения этих требований ИК собирается из набора шестиугольных детекторов, каждый из которых состоит из пластин вольфрамового сплава примерно 2 мм толщиной (как поглотитель — одна каскадная единица) и трех слоев сцинтилляционных стрипов высотой 8 мм каждый и шириной 25 мм. Ширина стрипа была оптимизирована как компромисс между требованием получить достаточную точность реконструкции формы каскада и, следовательно, направления прилета первичной частицы, и не умеренным числом электронных каналов, необходимых для считывания сигналов всех стрипов. Светосбор осуществляется по оптоволокну, проложенным в пазах стрипов. Сами стрипы размещены в трех направлениях при углах 0° , 60° , 120° , рис. 1а. Подобная сцинтилляционная сборка и материал поглотителя были ис-

пользованы в эксперименте НУКЛОН [33], рис. 1б. Предлагаемая методика имеет достаточно высокие характеристики для решения задач ОЛВЭ — равномерность светосбора по площади в единицы процентов, и не менее 10 фотоэлектронов от одного события *min* (minimally ionizing particle) — пересечения стрипа одной однозарядной релятивистской частицей.

Задачи проекта могут быть реализованы только в случае достаточно габаритного и массивного ионизационного калориметра. Рассмотрены два варианта ИК с учетом развития новых отечественных ракетносителей тяжелого и сверхтяжелого классов — ИК массой 10 т [33] и ИК 30 т [34]. После детального моделирования для оптимизации формы ИК [32] определены габариты двух основных вариантов для калориметров 10 т (высота шестиугольной призмы $h = 1470$ мм, диаметр шестиугольника $d = 1600$ мм) и 30 т ($h = 2330$ мм, $d = 2300$ мм), рис. 2, рассчитаны геометрические факторы и оценена точность измерения энергии для них.

Точность измерения энергии (ширина аппаратной функции) для ионизационных калориметров зависит от толщины вещества в направлении траектории частицы, попавшей в калориметр. Калориметр спектрометра ОЛВЭ (в обоих вариантах, 10 и 30 т) допускает прилет частицы с любого направления, но каждая отдельная траектория первичной частицы дает свою собственную длину части траектории частицы, пересекающей калориметр. Это означает, что для каждой частицы имеется свой собственный эффективный калориметр определенной толщины, и если рассмотреть теперь все возможные траектории прилета частиц для изотропного падения частиц на спектрометр, то мы получим распределение по толщинам таких эффективных калориметров. Каждой толщине калориметра отвечает своя собственная ошибка в измерении энергии. Чем больше толщина, тем меньше ошибка. Таким образом, по распределению эффективных толщин калориметра для разных траекторий первичной частицы получаем соответствующее ему распределение величин ошибок определения энергии. Это распределение исчерпывающим образом описывает информацию об ошибках определения энергии. На рис. 3 приведено распределение ошибок измерения энергии (в процентах) для калориметров массой 10 т (а) и 30 т (б), полученное Монте-Карло-моделированием с калориметрами, показанными на рис. 2. По рисункам можно увидеть, например, что для калориметра 10 т наиболее вероятная ошибка измерения энергии составляет 18%, для калориметра 30 т — 11%. Вместе с каждым распределением ошибок на рис. 3 показана информационная панель, на которой приведено среднее энергетическое разрешение по всему распределению и рассчитанный геометрический фактор эксперимента. Для ИК 10 т эффективный геометрический фактор составляет $\Omega = 11.8 \text{ м}^2 \text{ ср}$ при среднем значении разрешения 27.9%. Для ИК 30 т эти значения со-

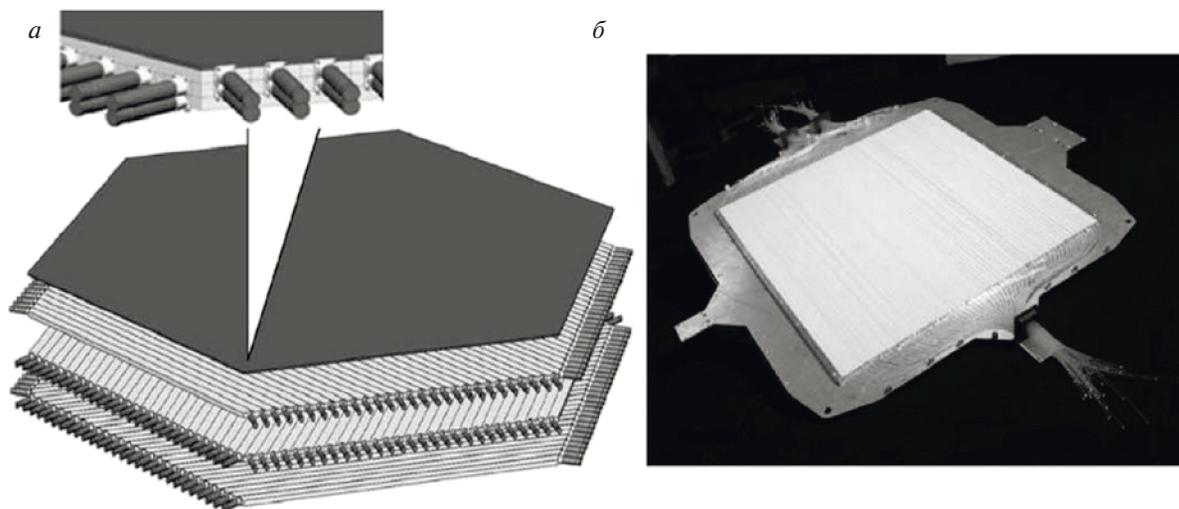


Рис. 1. Проектный облик детектора ИК ОЛВЭ (а), фотография сцинтиляционной сборки из аппаратуры НУКЛОН (б).

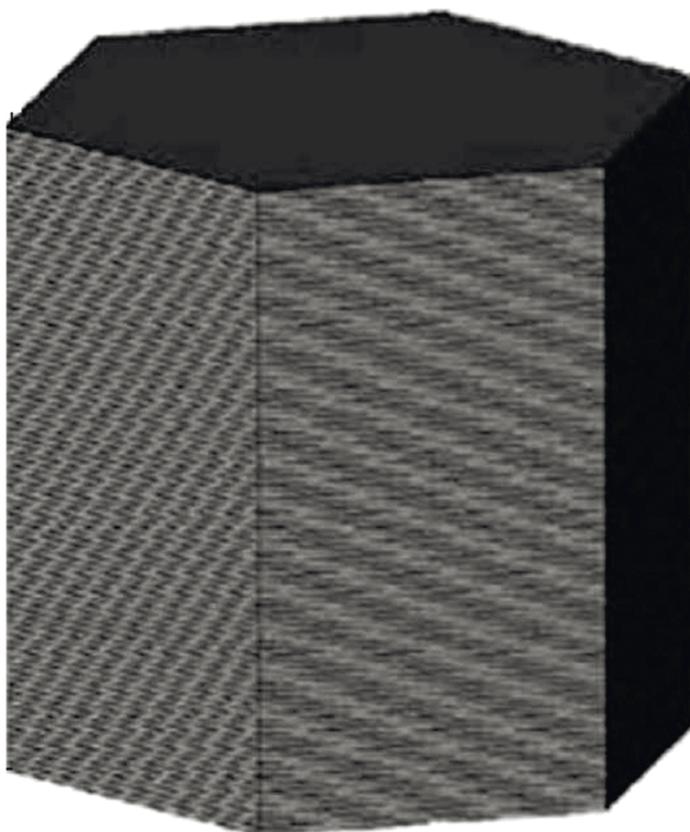


Рис. 2. Сборка детекторов ИК ОЛВЭ. Для массы ИК 10 т высота шестиугольной призмы $h = 1470$ мм, диаметр шестиугольника $d = 1600$ мм, для массы 30 т $h = 2330$ мм, $d = 2300$ мм.

ставляют $\Omega = 30.1 \text{ м}^2 \text{ ср}$ и 21.6% соответственно. Приведенные цифры соответствуют падающим протонам с энергией 2 ТэВ. Для энергий протонов выше нескольких сотен ГэВ энергетическое разрешение слабо зависит от энергии, поэтому полученные цифры действительны для всего энергетического диапазона, покрываемого ОЛВЭ. Протоны представляют самый сложный случай измерения энергии для кало-

риметра из-за наибольшей длины пробега до ядерного взаимодействия, по сравнению с более тяжелыми ядрами. Для ядер с зарядом больше единицы геометрический фактор повышается на величину вплоть до нескольких десятков процентов, со значительным повышением точности в зависимости от типа ядра.

Для электронов/позитронов и гамма-квантов, для калориметра весом 10 т геометрический фактор со-

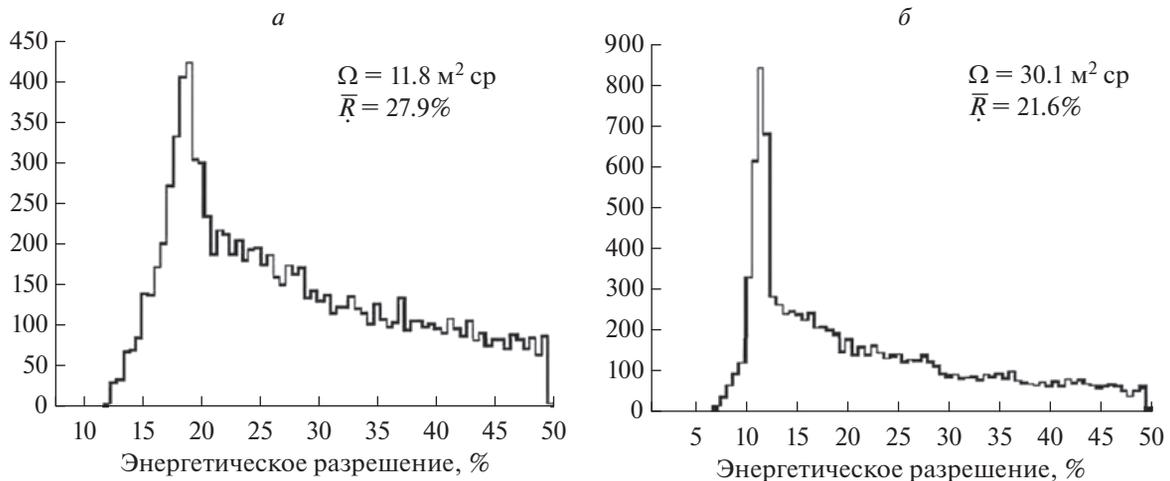


Рис. 3. Эффективный геометрический фактор и распределения энергетического разрешения для протонов при калориметре 10 т (а) и 30 т (б).

ставляет величину $\Omega \sim 20 \text{ м}^2 \text{ ср}$, для калориметра 30 т — $\Omega \sim 45 \text{ м}^2 \text{ ср}$, при средней точности измерений энергии 1–2%, которая определяется почти исключительно величиной шума электроники и ее собственной точностью [32].

3.3. Система измерения заряда ОЛВЭ

Вокруг ИК (рис. 4а) размещена система измерения заряда, которая представляет собой четырехслойную кремниевую матрицу, разделенную на четырехугольные детекторы. Структурно матрица состоит из сборок, собранных по методике, аналогичной примененной в аппаратуре НУКЛОН [10] (рис. 4б). Методика допускает создание сборок, требуемых размеров в соответствии с формой ИК ОЛВЭ, что дает перекрытие рабочей апертуры практически на 100%. Для повышения точности при сверхвысоких энергиях размер площади детектора уменьшен, в сравнении с аппаратурой НУКЛОН, до 1 см^2 . Основным искажающим фактором в зарядовых измерениях при использовании кремниевой матрицы в комплексе с ионизационным калориметром является воздействие обратного тока из каскада ИК. Используя опыт моделирования обратных токов авторами для экспериментов АГЭС и НУКЛОН и то, что моделирование для этих экспериментов разумно соответствовало эксперименту, для геометрии ИК ОЛВЭ также было проведено детальное моделирование величин обратного тока в планируемом эксперименте [32]. На рис. 5 представлены результаты такого моделирования. По ним видно, что даже для протонов с энергией больше 10^{15} эВ вероятность регистрации эмулированного обратного протона или более тяжелых ядер составляет около 1%. Для более тяжелых ядер эта вероятность составляет около 0.3%, а для более низких начальных энергий частиц эти вероятности ниже. Среднее зарядовое разрешение с учетом всех факторов искажения оценено не

более 0.2 зарядовых единиц для группы ядер CNO. Эта величина подтверждается практикой работы в эксперименте НУКЛОН, в котором, с точностью до размеров кремниевых детекторов, система измерения заряда устроена точно так же, как в эксперименте ОЛВЭ.

3.4. Основные характеристики научной аппаратуры ОЛВЭ

Представленная выше геометрия и структура аппаратуры ОЛВЭ позволяет оценить количество электронных каналов и энергопотребление обсерватории ОЛВЭ, с учетом предположения, что считывающая и управляющая электроника будет, как минимум, не более энергозатратной, чем электроника аппаратуры НУКЛОН. В табл. 1 представлено количество электронных каналов, энергопотребление и ежедневный объем данных ОЛВЭ в зависимости от массы калориметра. В табл. 2 приведена оценка ежедневного объема данных в зависимости от массы ионизационного калориметра. В табл. 2–4 даны оценки ожидаемой статистики в зависимости от массы калориметра и времени экспозиции для протонов и ядер, электронов + позитронов и гамма-квантов соответственно. Данные для спектра всех частиц в табл. 2 взяты из работы [35], данные для электронов + позитронов в табл. 3 взяты из работы [27], данные по интенсивности гамма-излучения в табл. 4 даны для средних галактических широт 10° – 30° [36]. Как видно из таблиц, все поставленные задачи при успешной реализации аппаратуры ОЛВЭ выполнит в полном объеме.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космический эксперимент ОЛВЭ по своим характеристикам — “прорывной” эксперимент, который на ближайшие десятилетия определит направление исследований в астрофизике частиц высоких энер-

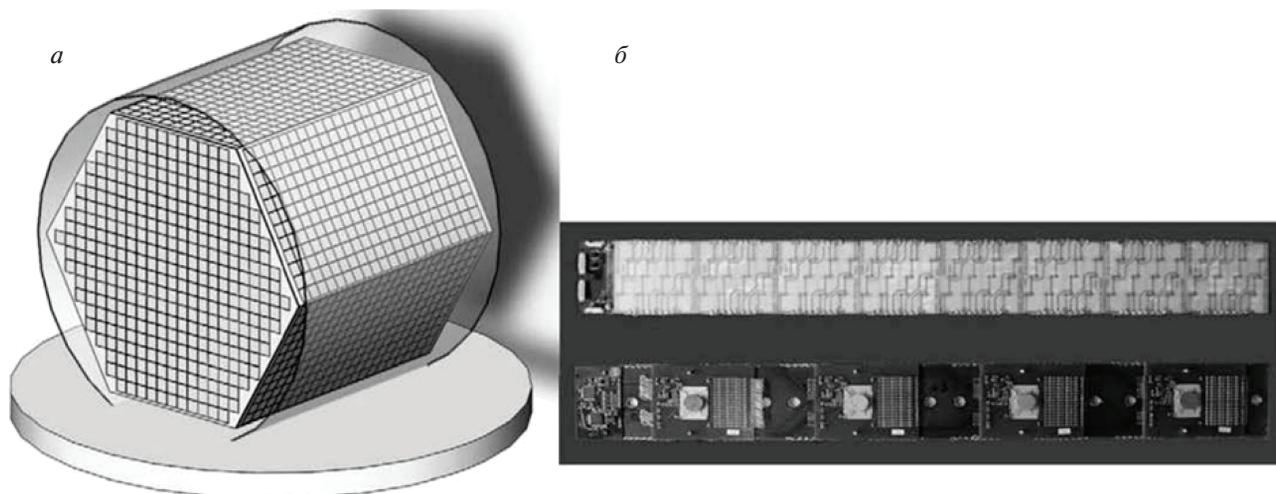


Рис. 4. Проектный облик системы измерения заряда аппаратуры ОЛВЭ (а), фотография сборки аппаратуры НУКЛОН (б).

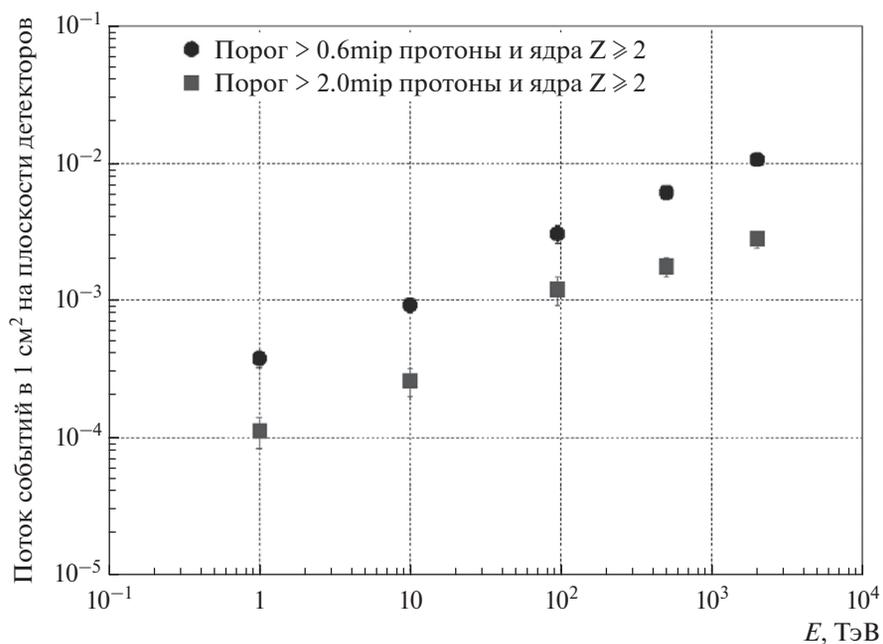


Рис. 5. Вероятность регистрации частицы обратного тока в детекторе заряда площадью 1 см при пороге в 0.6 mip (mip — однозарядная релятивистская частица) при регистрации протонов и при пороге 2.0 МIP при регистрации ядер с $Z \geq 2$.

Таблица 1. Количество электронных каналов, энергопотребление и ежедневный объем данных ОЛВЭ в зависимости от массы калориметра

Масса калориметра	10 т	30 т
Каналы система измерения заряда	270 000	570 000
Каналы ионизационного калориметра	6 700	14 000
Энергопотребление, кВт	5	10.5
Энергетический порог (>300 ГэВ), Гб/сутки	800	2400
Энергетический порог (>1000 ГэВ), Гб/сутки	100	300

Таблица 2. Ожидаемая статистика в зависимости от массы ИК и времени экспозиции, протоны и ядра

Е, эВ	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	5×10^{15}	10^{16}
10 т 7 лет	7.1×10^8	1.5×10^7	3.5×10^5	6.1×10^3	2.8×10^2	65
30 т 7 лет	1.8×10^9	3.8×10^7	9.0×10^5	1.6×10^4	7.2×10^2	164

Таблица 3. Ожидаемая статистика в зависимости от массы ИК и времени экспозиции, электроны + позитроны

Е, эВ	3×10^{11}	10^{12}	3×10^{12}	10^{13}
10 т 7 лет	3.3×10^6	1.7×10^5	6.2×10^3	—
30 т 7 лет	8.2×10^6	4.4×10^5	1.6×10^4	—

Таблица 4. Ожидаемая статистика в зависимости от массы ИК и времени экспозиции, диффузные гамма-кванты для средних галактических широт $10^\circ - 30^\circ$

Е, эВ	3×10^{11}	10^{12}	3×10^{12}	10^{13}
10 т 7 лет	2.0×10^4	3.7×10^3	9.4×10^2	209
30 т 7 лет	5.1×10^4	9.1×10^3	2.4×10^3	530

гий. Проект имеет высокий уровень технологической подготовленности, в реализации используются только отечественные технологии, проект прошел все стадии НИР и включен в Федеральную космическую программу России. Реализация эксперимента запланирована на период 2026–2035 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский, Происхождение космических лучей (Изд-во Акад. наук СССР, Москва, 1963).
- Г. Ф. Крымский, Докл. Акад. наук СССР **234**, 1306 (1977).
- A. R. Bell, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **182**, 147 (1978).
- W. I. Axford, in Proceedings of the 17th International Cosmic Ray Conference (Paris, France, 1981), Vol. 12, p. 155.
- V. S. Ptuskin and V. N. Zirakashvili, Astron. Astrophys. **429**, 755 (2005).
- E. G. Berezhko, Adv. Space Res. **41**, 429 (2008).
- T. G. Guzik, J. H. Adams, H. S. Ahn, G. Bashindzhagyan, J. Chang, M. Christl, A. R. Fazely, O. Ganel, D. Granger, R. Gunasingha, Y. J. Han, J. B. Isbert, H. J. Kim, K. C. Kim, S. K. Kim, E. N. Kouznetsov, et al., Adv. Space Res. **33**, 1763 (2004).
- M. Casolino, O. Adriani, M. Ambriola, G. C. Barbarino, A. Basili, G. A. Bazilevskaia, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bonghi, V. Bonvicini, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, G. Castellini, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **588**, 243 (2008).
- AMS Collab. (M. Aguilar et al.), Phys. Rep. **366**, 331 (2002).
- E. Atkin, V. Bulatov, V. Dorokhov, N. Gorbunov, S. Filippov, V. Grebenyuk, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, M. Merkin, A. Pakhomov, D. Podorozhny, D. Polkov, S. Porokhovoy, V. Shumikhin, L. Sveshnikova, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **770**, 189 (2015).
- H. S. Ahn, P. Allison, M. G. Bagliesi, J. J. Beatty, G. Bigongiari, P. Boyle, J. T. Childers, N. B. Conklin, S. Coutu, M. A. DuVernois, O. Ganel, J. H. Han, J. A. Jeon, K. C. Kim, J. K. Lee, M. H. Lee, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **579**, 1034 (2007).
- O. Adriani, Y. Akaike, K. Asano, Y. Asaoka, M. G. Bagliesi, G. Bigongiari, W. R. Binns, S. Bonechi, M. Bonghi, J. H. Buckley, G. Castellini, M. L. Cherry, G. Collazuol, K. Ebisawa, V. Di Felice, H. Fuke, et al., J. Phys.: Conf. Ser. **632**, 012023 (2015).
- J. Chang, G. Ambrosi, Q. An, R. Asfandiyarov, P. Azzarello, P. Bernardini, B. Bertucci, M. S. Cai, M. Caragiulo, D. Y. Chen, H. F. Chen, J. L. Chen, W. Chen, M. Y. Cui, T. S. Cui, A. D'Amone, et al., Astropart. Phys. **95**, 6 (2017).
- А. Д. Панов, Д. М. Подорожный, А. Н. Турундаевский; <https://doi.org/10.24108/preprints-3112772>
- С. Б. Шаулов, В. А. Рябов, А. Л. Щепетов, С. Е. Пятовский, В. В. Жуков, Е. А. Куприянова, Е. Н. Гудкова, Письма в ЖЭТФ **116**, 3 (2022).
- W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner, M. H. Israel, M. P. Kertzman, J. Klarmann, B. J. Newport, E. C. Stone, and C. J. Waddington, Astrophys. J. **346**, 997 (1989).
- W. R. Binns, R. G. Bose, D. L. Braun, T. J. Brandt, W. M. Daniels, P. F. Dowkontt, S. P. Fitzsimmons, D. J. Hahne, T. Hams, M. H. Israel, J. Klemic, A. W. Labrador, J. T. Link, R. A. Mewaldt, J. W. Mitchell, P. Moore, et al., Astrophys. J. **788**, 18 (2014).
- J. Donnelly, A. Thompson, D. O'Sullivan, J. Daly, L. Drury, V. Domingo, and K.-P. Wenzel, Astrophys. J. **747**, 40 (2012).

19. M. H. Israel, W. R. Binns, E. R. Christian, A. C. Cummings, G. A. de Nolfo, R. A. Leske, R. A. Mewaldt, E. C. Stone, T. T. von Roseninge, and M. E. Wiedenbeck, in Proceedings of the 32th International Cosmic Ray Conference (Beijing, China, 2011), Vol. 6, p. 32.
20. V. Bulatov, S. Fillippov, D. Karmanov, I. Kovalev, A. Kurganov, M. Panasyuk, A. Panov, D. Podorozhny, D. Polkov, L. Tkatchev, P. Tkatchev, A. Turundaevskiy, and O. Vasiliev, *Adv. Space Res.* **64**, 2610 (2019).
21. I. V. Moskalenko and A. W. Strong, *Astrophys. J.* **493**, 694 (1998); astro-ph/9710124.
22. J. Chang, J. H. Adams, H. S. Ahn, G. L. Bashindzhagyan, M. Christl, O. Ganel, T. G. Guzik, J. Isbert, K. C. Kim, E. N. Kuznetsov, M. I. Panasyuk, A. D. Panov, W. K. H. Schmidt, E. S. Seo, N. V. Sokolskaya, J. W. Watts, et al., *Nature* **456**, 362 (2008).
23. S. V. Borisov, M. Boezio, S. A. Voronov, A. M. Galper, G. Jerse, A. V. Karelin, E. Mocchiutti, P. Picozza, O. Adriani, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, V. Bonvicini, L. Bonechi, S. Bottai, A. Bruno, A. Vacchi, et al., *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **37**, 184 (2010).
24. S. Abdollahi et al. (The Fermi-LAT Collab.), *Phys. Rev. D* **95**, 082007 (2017); arXiv: 1704.07195.
25. M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, G. Ambrosi, L. Arruda, N. Attig, F. Barao, L. Barrin, A. Bartoloni, S. Basegmez-du Pree, J. Bates, R. Battiston, M. Behlmann, B. Beischer, J. Berdugo, B. Bertucci, V. Bindi, et al., *Phys. Rep.* **894**, 1 (2021).
26. G. Ambrosi, Q. An, R. Asfandiyarov, P. Azzarello, P. Bernardini, B. Bertucci, M. S. Cai, J. Chang, D. Y. Chen, H. F. Chen, J. L. Chen, W. Chen, M. Y. Cui, T. S. Cui, A. D'Amone, A. De Benedittis, I. De Mitri, et al., *Nature* **552**, 63 (2017).
27. O. Adriani et al. (CALET Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **120**, 261102 (2018).
28. A. D. Panov, *J. Phys.: Conf. Ser.* **409**, 012004 (2013).
29. O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, V. Bonvicini, S. Bottai, A. Bruno, F. Cafagna, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini, et al., *Nature* **458**, 607(2009).
30. Н. Л. Григоров, И. Д. Рапопорт, В. Я. Шестоперов, Частицы высоких энергий в космических лучах (Наука, Москва, 1973).
31. A. Turundaevskiy and D. Podorozhnyi, *Adv. Space Res.* **60**, 1578 (2009).
32. A. Kurganov, D. Karmanov, A. Panov, D. Podorozhny, L. Tkachev, and A. Turundaevsky, arXiv: 2306.13406 [Astro-ph.HE].
33. РН “Союз-5”, <https://www.roscosmos.ru/28990/>
34. РН “Ангара-А5”, <https://www.roscosmos.ru/36320/>
35. A. Turundaevskiy, D. Karmanov, I. Kovalev, I. Kudryashov, A. Kurganov, A. Panov, and D. Podorozhny, *Adv. Space Res.* **70**, 2696 (2022).
36. A. Neronov and D. Semikoz, *Astron. Astrophys.* **633**, A94 (2020).

PROJECT OLVE (OBSERVATORY OF HIGH-ENERGY COSMIC RAYS): OBJECTIVES AND DESIGN FORM

D. Podorozhny¹⁾, D. Karmanov¹⁾, I. Kovalev¹⁾, A. Kurganov¹⁾, A. Panov¹⁾, A. Turundaevsky¹⁾

¹⁾Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The High Energy Cosmic Ray Observatory (HERO) is an experimental design for the direct study of cosmic rays based on the use of an ultra-heavy ionization calorimeter. The effective geometric factor of the facility will be at least 12 m² sr for cosmic-ray protons and at least 16–20 m² sr for nuclei and electrons. During 5–7 years of exposure, this mission will make it possible to measure the energy spectra of all common and rare cosmic-ray nuclei in the energy region 10¹²–10¹⁶ eV/particle with element-by-element resolution of the charge of nuclei and with sufficiently high energy resolution. It is planned to study not only the charge range of cosmic-ray nuclei $Z = 1 - 26$, but also the detection of super-heavy nuclei beyond the iron peak, as well as high-energy electrons, positrons and gamma rays. The main objectives, design appearance and characteristics of the space mission are discussed.