

Обсерватория лучей высокой энергии: задачи и проектный облик

2023 Д.М. Подорожный¹, Д.Е. Карманов, И.М.Ковалев, А.А.Курганов, А.Д.Панов,
А.Н. Турундаевский.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына.,
Москва, Россия

Обсерватория лучей высоких энергий (ОЛВЭ) — это проект космического эксперимента, основанного на тяжелом ионизационном калориметре для прямого изучения космических лучей. Эффективный геометрический фактор установки не менее $12\text{ м}^2\text{ ср}$ для протонов и не менее $16\text{-}20\text{ м}^2\text{ ср}$ для ядер и электронов. В течение $\sim 5\text{-}7$ 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 по отдельным зарядам с высоким энергетическим разрешением. Планируется исследование сверхтяжелых ядер за пиком железа, высокоэнергичных протонов и гамма-квантов. Обсуждаются основные задачи, проектный облик и характеристики космической миссии.

1. ВВЕДЕНИЕ

В части фундаментальных исследований космоса признано, что космические лучи (КЛ) несут в себе информацию об основных источниках (ускорителях) и характеристиках межзвездной среды - мира, в котором мы живем. Результаты этих исследований - необходимый фактический материал для построения моделей Галактики, в том числе, 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 экзотических явлений, которые могут дать экспериментальные доказательства параметров частиц темной материи и поиска фактов существования частиц странной материи. Наиболее актуальными задачами физики космических лучей в настоящее время являются определение химического состава обильных КЛ с максимально возможным продвижением вверх по энергетической шкале и регистрация зарядового (изотопного) состава сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа. Обе эти компоненты КЛ рождены в наиболее катастрофических процессах Галактики и именно по ним стоятся современные модели КЛ. Изучение спектров электронов и позитронов крайне важно с точки зрения исследования близких

¹ E-mail dmpo@bk.ru

источников и поиска возможных параметров взаимодействия частиц темной материи, определяемых по наклону и в особенностях энергетических спектров. Главная трудность в исследованиях КЛ - это их круто падающие по степенному закону энергетические спектры, что требует выноса за пределы атмосферы значительной габаритно - массивной аппаратуры.

2. НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ МИССИИ ОЛВЭ

По-прежнему одной из центральной задач в исследованиях КЛ остается задача астрофизической интерпретации феномена «колена» Христиансена-Куликова в области энергий $\sim 3 \cdot 10^{15}$ эВ/частицу, резкий излом в энергетическом спектре всех частиц с показателя ~ 2.7 на значение ~ 3.2 [1]. Убедительного объяснения этого факта пока не существует и эта задача ждет своего решения более 60 лет. Ключом к решению данной проблемы может послужить статистически обеспеченное детальное определение химического состава КЛ в данной области.

Долгое время, начиная с основополагающей монографии [1], в которой был предложен основной механизм ускорения КЛ в оболочках сверхновых, с универсальным степенным характером энергетического спектра, считалось, что спектры элементов КЛ выше 10^{12} эВ/частицу до «колена» имеют приблизительно одинаковый степенной характер. В многочисленных работах, уточняющих этот процесс с учетом структуры Галактики [например 2, 3, 4, 5, 6], в большинстве своем была принята «стандартная модель» физики КЛ, в которой, исходя из парадигмы множества источников КЛ в Галактике, наблюдаемые спектры должны иметь показатель, близкий к 2.7. Разброс в полученных немногочисленных экспериментальных результатах с 60-х годов 20 века до его конца объяснялся недостаточной статистической обеспеченностью данных и неточностью в измерениях.

Эксперименты нового поколения 21 века ATIC [7], PAMELA [8], AMS-02 [9], НУКЛОН [10], CREAM [11], CALET [12], DAMPE [13] получили ряд статистически обеспеченных данных о ряде особенностей в химическом составе и энергетических спектрах КЛ в области энергий от $3 \cdot 10^{10}$ и, частично, до 10^{14} эВ/частица. Не вдаваясь в подробности (этот материал достаточно подробно представлен в обзоре [14]), можно отметить, что сделанные в последнее время открытия не

вписываются в «стандартную теорию» 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 продолжатся особенности и 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. Абсолютно непонятен состав, а может быть и природа КЛ [15], после «колена». Таким образом, необходимо увеличение банка событий по прямому исследованию КЛ приблизительно на два порядка, с продолжением исследования энергетического диапазона вплоть до энергии 10^{16} эВ/частица. По мнению авторов, энергетическая точность для всех элементов КЛ в энергетическом диапазоне 10^{15} - 10^{16} эВ/частица не должна превышать 30% для всех элементов КЛ, в банке должно быть не менее 100 событий частиц КЛ с энергией выше 10^{16} эВ/частица. 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 достаточной статистической обеспеченностью. Зарядовое разрешение не должно превышать 0.2 зарядовой единицы, также для всех элементов и во всем энергетическом диапазоне. При наличии такого банка событий возможна существенная, экспериментально подтвержденная, корректировка «стандартной теории» физики КЛ. Создание такого банка есть центральная задача космического эксперимента ОЛВЭ.

Знания о Галактике будут неполными без изучения второй важнейшей компоненты КЛ - зарядового состава сверхтяжелых ядер КЛ за пиком железа. Эти данные несут в себе знания о галактическом нуклеосинтезе в современную космологическую эпоху и определяют параметры космического пространства в ближней области Галактики. Основные данные об элементном составе сверхтяжелых ядер КЛ были определены в экспериментах: HEAO-3-C3 [16], SUPERTIGER [17], LDEF [18], ACE-CRIS [19]. Эксперимент HEAO-3-C3 (гамма-рентгеновский спектрометр) 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 $\sim 0,6$ м² ср год. Эксперимент LDEF (твердотельный трековый детектор) был нацелен на регистрацию субактинидов ($70 \leq Z \leq 87$) и актинидов ($88 \leq Z \leq 103$). С учетом огромной экспозиции, в ~ 170 м² ср год, было

зарегистрировано несколько сотен субактиноидов и 35 шт. актиноидов до величины $Z=96$, единичное событие. Изотопный состав тяжелых ядер КЛ был определен лишь в эксперименте ACE-CRIS (сцинтилляционный трекер, кремниевой калориметр) до значений $Z=32$. Полученный в перечисленных экспериментах результат определил существенные указания на особенности в зарядовом составе тяжелых КЛ и дает заметные отличия от химического состава Солнца (более подробно в обзоре [14]). Но, как и в случае высокими и сверхвысокими энергиями обильных ядер, остро не хватает статистики. Дополнительной задачей космического эксперимента ОЛВЭ должно быть использования всего объема научной аппаратуры в целях исследования тяжелых и сверхтяжелых ядер с зарядом выше $Z=26$. При указанном выше требовании к фактору экспозиции, в этом случае статистка ядер с области $Z=26 - 69$ будет увеличена на полтора-два порядка, а результаты эксперимента LDEF будут, как минимум, повторены. При некоторой доработке [20] возможно определение изотопного состава тяжелых ядер КЛ вплоть до значений $Z\sim 60$.

Лептонная составляющая КЛ представлена смесью электронов и позитронов. Эти частицы КЛ, исходя из их малой массы, интенсивно теряют энергию при синхронном излучении в межзвездных магнитных полях, и на обратное комптоновское рассеяние 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 энергий $>10^{10}$ эВ (более подробно в обзоре [14]). В области предельно зарегистрированных энергий $>3 \times 10^{11}$ эВ, где высоки статистические ошибки, наблюдается заметное различие между экспериментальными данными. Эксперимент ATIC в этой области ($3 \times 10^{11} - 8 \times 10^{11}$ эВ) определил указания на ряд неоднородностей [28] в тонкой структуре спектра. Сенсацией был эксцесс в потоке позитронов, обнаруженный в эксперименте PAMELA [29] – при энергиях больше $\sim 10^{10}$ эВ когда был обнаружен резкий рост соотношения $e^+/(e^+ + e^-)$. Эксперименты AMS-02 [25] и Fermi [24] этот феномен подтвердили, а AMS-02 определил указания на начало спада этого бампа в области

энергий $\sim 2 \times 10^{11}$ эВ. Из приведенного материала видно, что для изучения спектра электронов и позитронов остро не хватает данных, начиная с энергий $> 3 \times 10^{11}$ эВ. Исходя из требований к аппаратуре ОЛВЭ в задаче по регистрации обильных ядер высокой энергии, в эксперименте ОЛВЭ, без доработки аппаратуры, банк событий электронов и позитронов должен быть увеличен приблизительно на полтора порядка при энергиях $> 3 \times 10^{11}$ эВ. В аппаратуре ОЛВЭ не предусмотрено использования масс-спектрометра для определения знака заряда, для выделения позитронной компоненты. Однако можно воспользоваться методикой, примененной в эксперименте Fermi [24] используя анизотропный поток заряженных частиц в магнитном поле Земли. Количественная оценка такого исследования будет сделана при определении параметров орбиты космического аппарата ОЛВЭ и габаритных размеров аппаратуры.

Методика по выделению из высокоэнергичного космического излучения компоненты гамма-квантов близка к методике выделения электронно-позитронной компоненты. Однако без существенной доработки аппаратуры, которая нереальна при значительных габаритах ОЛВЭ, ожидаемые характеристики не позволяют квалифицировать ОЛВЭ как полноценный гамма-спектрометр, методика ИК дает ожидаемый энергетический порог $\sim 2 \times 10^{11}$ эВ, и не обеспечит высокое угловое разрешение, которое определяется по форме каскада, и трудно ожидать разрешение выше 1° .

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 экспериментах.
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

регистрации 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. В качестве системы измерения заряда определена многослойная кремниевая матрица падовых 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 тонн, в этом случае масса научной аппаратуры может достигнуть 12 тонн.

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 отечественных 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, Fe, плотность $\rho=7,8$ г/см³, как гетерогенный ИК (железо, полистирол) в эксперименте СОКОЛ [31], либо тяжелый скнтиллятор, как, например, гомогенный ИК из ВГО, $\rho=7.1$ г/см³, в эксперименте АТИС [22]. В этом случае идет одновременное эффективное развитие как адронной так и электромагнитной частей каскада. Для регистрации лептонной компоненты оптимально использовать наиболее тяжелый поглотитель ИК (свинец, вольфрам) для наиболее эффективного развития электромагнитного каскада. Для объединения этих требований, после математического моделирования [32] в качестве поглотителя

ИК ОЛВЭ было выбрано сочетание очень легкого активного вещества, сцинтиллятора из полистирола, $\rho \sim 1.0 \text{ г/см}^3$, и очень тяжелого поглотителя из вольфрамо-медно-никелевого сплава, $\rho \sim 16.2 \text{ г/см}^3$. 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 угол обзора в телесном угле 4π и определять форму каскада с требуемой точностью для выделения лептонной компоненты из протонного потока. Для удовлетворения этих требований ИК состоит из набора шестиугольных детекторов, каждый из которых состоит из поглотителя вольфрамового сплава $\sim 2 \text{ мм}$ (одна каскадная единица), и трех слоев сцинтилляционных стрипов высотой 8 мм каждый и шириной 25 мм . 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 использованы в эксперименте НУКЛОН [33], Рис. 1б, и предлагаемая методика имеет достаточно высокие характеристики для задач ОЛВЭ – равномерность светосбора по площади в единицы процентов, и не менее 10 фотоэлектронов от одного mip (пересечения стрипа одной однозарядной релятивистской частицы). Задачи проекта могут быть реализованы только в случае габаритного и массивного ионизационного калориметра. Рассмотрены два варианта ИК, с учетом развития новых отечественных ракетносителей тяжелого и сверхтяжелого классов – в ИК массой 10 тонн [33] и ИК 30 тонн [34]. После детального моделирования по оптимизации [32] определены габариты двух вариантов ИК, Рис. 2а, геометрические факторы и оценка точности в измерениях энергии для этих габаритов. Для ИК 10 тонн Рис. 2б, для ИК 30 тонн Рис. 2в. На рис.3 приведены эффективные геометрические факторы и оценка точности в измерениях энергии для протонов, как наиболее сложной компоненты для регистрации КЛ. Для ИК 10 тонн эффективный геометрический фактор $\Omega \sim 12 \text{ м}^2 \text{ ср.}$, основной пик распределения точности находится при разрешении 18% при среднем значении в $\sim 28\%$. В случае ИК 30 тонн эти значения составляют $\Omega \sim 30 \text{ м}^2 \text{ ср.}$, 11% и $\sim 22\%$ соответственно. Для ядер с $Z \geq 2$ геометрический фактор повышается на несколько десятков процентов со значительным

повышением точности, в зависимости от типа ядра. Для электронов/позитронов и гамма-квантов при ИК 10 тонн $\Omega \sim 20 \text{ м}^2 \text{ ср}$, при ИК 30 тонн $\Omega \sim 45 \text{ м}^2 \text{ ср}$, при средней точности $\sim 1\text{-}2\%$ [32].

3.3. Система измерения заряда ОЛВЭ

Вокруг ИК (Рис.4а) размещена система измерения заряда, которая представляет собой четырехслойную кремниевую падовую матрицу. Структурно матрица состоит из ледеров (сборок) которые используют методику, аналогичную примененной в аппаратуре НУКЛОН [10], (Рис.4б). Методика позволяет исполнение ледеров требуемых размеров в соответствии с формой ИК, что дает перекрытие рабочей апертуры практически на 100%. Для повышения точности при сверхвысоких энергиях размер пада 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 экспериментальные значения величин обратного тока, полученные в экспериментах АТЭС и НУКЛОН, для геометрии ИК ОЛВЭ было проведено детальное моделирование величин обратного тока в планируемом эксперименте [32]. На Рис.5 представлены результаты такого моделирования, по которым видно, что даже для протонов с энергией $>10^{15} \text{ эВ}$ 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 еще ниже. Среднее зарядовое разрешение с учетом всех факторов искажения оценено как менее 0.2 зарядовых единиц во всем диапазоне зарядов.

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 энергозатратная, чем электроника аппаратуры НУКЛОН. В Таблице 1 представлено количество электронных каналов и энергопотребление в зависимости от массы ионизационного калориметра. В Таблице 2 приведена оценка ежедневного объема данных в зависимости от массы ионизационного калориметра. В Таблице 3, Таблице 4, Таблице 5 дана оценка ожидаемой статистики в зависимости

от массы калориметра и времени экспозиции для протонов и ядер, электронов+позитронов, гамма-квантов соответственно. Данные для спектра всех частиц в Таблице 3 взяты из работы [35], для электронов+позитронов в Таблице 4 взяты из работы [27], данные по интенсивности гамма излучения в Таблице 5 даны для средних галактических широт 10° - 30° [36]. Как видно из таблиц все поставленные задачи, при успешной реализации, аппаратура ОЛВЭ выполнит в полном объеме.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космический эксперимент ОЛВЭ по своим характеристикам – «прорывной» эксперимент, который на ближайшие десятилетия определит направления исследований в астрофизике частиц высоких энергий. Проект имеет высокий уровень технологической подготовленности в реализации с использованием отечественных технологий, прошел все стадии НИР и включен в Федеральную космическую программу России. Реализация эксперимента запланирована период 2026-2035 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гинзбург В Л, Сыроватский С И *Происхождение космических лучей*. (М,: Издательство Академии наук, 1963).
- [2] Крымский Г Ф Доклады Академии наук СССР 234(6), p 1306, 1977.
- [3] Bell A R Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 182, pp 147-156, 1978.
- [4] Axford W I, 17th International Cosmic Ray Conference. V. 12, 1981, p. 155.
- [5] Ptnskin V S, Zirakashvili V X Astronomy and Astrophysics, 429 755, 2005.
- [6] Berezhko E G, Advances in Space Reseach, 41, p 429, 2008.
- [7] Guzik, T. G, Adams, J. H. ; Ahn, H. S., Bashindzhagyan, G., Chang, J., Christl, M., Fazely, A. R., Ganel, O., Granger, D., Gunasingha, R., Han, Y. J., Isbert, J. B., Kim, H. J., Kim, K. C., Kim, S. K., Kouznetsov, *et al*. Advances in Space Reseach, 33 1763, 2004.
- [8] Casolino, M.; Adriani, O.; Ambriola, M.; Barbarino, G. C.; Basili, A.; Bazilevskaia, G. A.; Boezio, M.; Bogomolov, E. A.; Bonechi, L.; Bonghi, M.; Bonvicini, V.; Bruno, A.; Cafagna, F.; Campana, D.; Carlson, P.; Castellini, *et al* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 588 (1-2), pp. 243-246, 2008
- [9] M. Aguilar, J. Alcaraz, J. Allaby, B. Alpat, G. Ambrosi, H. Anderhub, L. Ao, A. Arefiev, P. Azzarello,

- E. Babucci, L. Baldini, M. Basile, D. Barancourt, F. Baraol, G. Barbier, G. Barreira, . *et al* Physics Reports, 366, 6, Physics Reports, p. 331-405, 2002.
- [10] Atkin E. Bulatov V., Dorokhov V., Gorbunov N., Filippov S., Grebenyuk V., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., Merkin M., Pakhomov A., Podorozhny D., Polkov D., Porokhovoy S., Shumikhin V., Sveshnikova, *et al*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 770, pp. 189-196, 2015.
- [11] 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,¹, J.A. Jeon, K.C. Kim, J.K. Lee, M.H. Lee, L. *et al* Nucl. Instr. Meth. A 579 1034, 2007.
- [12] O. Adriani, Y. Akaike, K. Asano, Y. Asaoka, M. G. Bagliesi, G. Bigongiari, W. R. Binns, S. Bonechi, M. Bongi, 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.
- [13] 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. Cheni, M.Y. Cui, T.S. Cui, A. D'Amone, *et al*, Astroparticle Physics, 95, pp 6-24, 2017.
- [14] Панов А. Д., Подорожный Д. М., Турундаевский А. Н., Прямые наблюдения космических лучей: современное состояние проблемы. PREPRINTS.RU <https://doi.org/10.24108/preprints-3112772>, 2023.
- [15] С. Б. Шаулов, В. А. Рябов, А. Л. Щепетов, С. Е. Пятовский, В. В. Жуков, Е. А. Куприянова, Е. Н. Гудкова, Письма в ЖЭТФ, т. 116, 1, стр. 3–12, 2022.
- [16] W. R. Binns, T. L. Garrard, P. S. Gibner, M. H. Israel, M. P. Kertzman, J. Klarman, B. J. Newport, E. C. Stone, and C. J. W Addington, Astrophysical Journal, 346, pp 997-1009, 1989.
- [17] 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*, Astrophysical Journal, 788:18 (11pp), 2014.
- [18] Donnelly, J.; Thompson, A.; O'Sullivan, D.; Daly, J; Drury, L., Domingo, V.; Wenzel, K. -P., Astrophysical Journal, 747:40, p 14, 2012.
- [19] M.H. Israel, W.R. Binns, E.R. Christian, A.C. Cummings, GA. de Nolfo, R.A. Leske, R.A. Mewaldt, E.C. Stone, T.T. von Rosenvinge, M.E. Wiedenbeck, 32nd ICRC, V.6, P.32, 2011.

- [20] Bulatov V., Fillippov S., Karmanov D., Kovalev I., Kurganov A., Panasyuk M., Panov A., Podorozhny D., Polkov D., Tkatchev L., Tkatchev P., Turundaevskiy A., Vasiliev O., *Advances in Space Research*, 64, 12, pp 2610-2618.
- [21] Strong A W, Moskalenko I V *Astrophysical Journal* 493, 694, 1998; arXiv: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, J P Wefel, J Wu, V I Zatsepin, *Nature* 456, pp 362-365, 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*, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute* 37(6) 184, 2010.
- [24] S. Abdollahi, M. Ackermann, M. Ajello, W. B. Atwood, L. Baldini, G. Barbiellini, D. Bastieri, R. Bellazzini, E. D. Bloom, R. Bonino, T. J. Brandt, J. Bregeon, P. Bruel, R. Buehler, R. A. Cameron, R. Caputo, *et al*, *Phys. Rev. D* 95(8) 082007, 2017; arXiv:1704.07195.
- [25] M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, G. Ambrosi, L. Arruda, N. Attig, F. Barao, L. Barrin, A. Bartoloni, S. Başęğmez-du Pree, J. Bates, R. Battiston, M. Behlmann, B. Beischer, J. Berdugo, B. Bertucci, V. Bindi, *et al*, *Physics Reports* 894 1, pp 1-116, 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*, *Phys. Rev. D* 95(8) 082007, 2017; arXiv:1704.07195.
- [27] O. Adriani, Y. Akaike, K. Asano, Y. Asaoka, M.G. Bagliesi, E. Berti, G. Bigongiari, W.R. Binns, S. Bonechi, M. Bongi, P. Brogi, J.H. Buckley, N. Cannady, G. Castellini, C. Checchia, M.L. Cherry, *et al*, *Physical Review Letters* 120, 261102, 2018.
- [28] Panov A D, *Journal of Physics: Conference Series* 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, pp 607-609, 2009
- [30] Н. Л. Григоров, И. Д. Рапопорт, В. Я. Шестоперов *Частицы высоких энергий в космических лучах* : (Москва : Наука, 1973).

- [31] Turundaevskiy A., Podorozhnyi D., *Advances in Space Research*, 60, pp 1578-1582
- [32] Alexander Kurganov, Dmitry Karmanov, Alexander Panov, Dmitry Podorozhny, Leonid Tkachev, Andrey Turundaevsky, *Astro-ph.HE*, arXiv:2306.13406, 2023
- [33] PH «Союз 5» <https://www.roscosmos.ru/28990/>
- [34] PH «Ангара 5В» <https://www.roscosmos.ru/36320/>
- [35] Turundaevskiy A., Karmanov D., Kovalev I., Kudryashov I., Kurganov A., Panov A., Podorozhny D., *Advances in Space Research*, 70, 9, pp 2696-2702, 2022.
- [36] A. Neronov and D. Semikoz, *Astronomy and Astrophysics*, 633, A94, 2020.

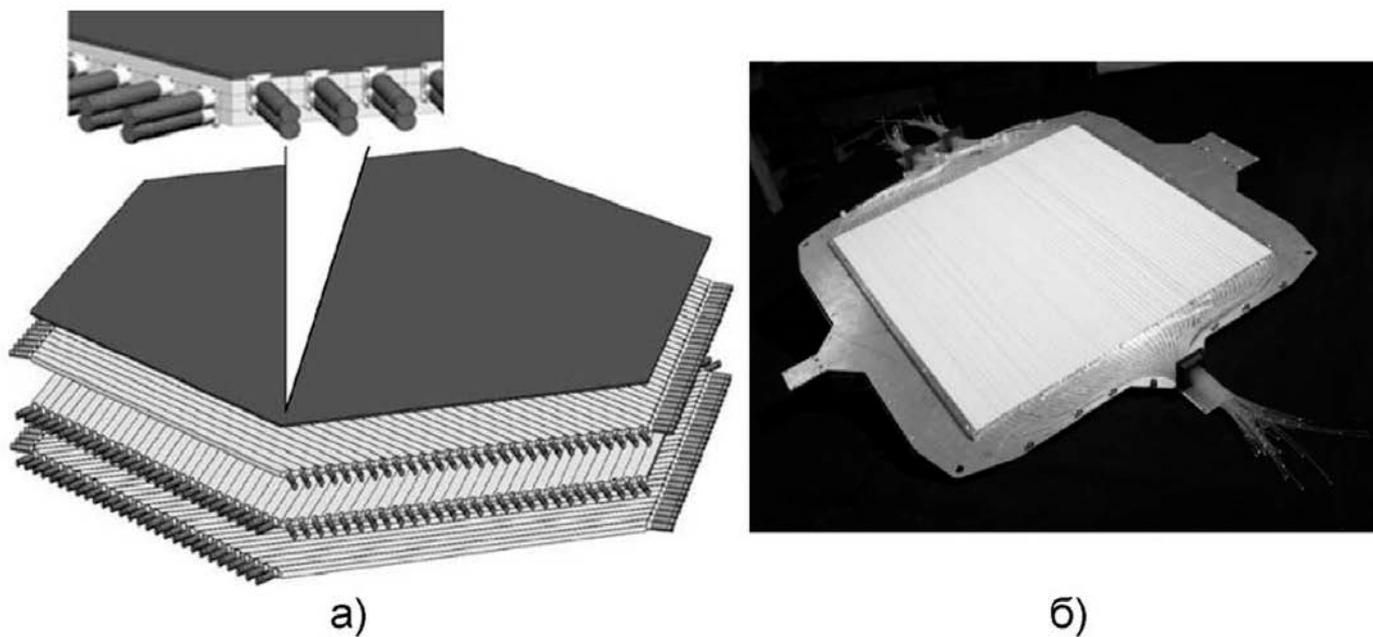


Рис. 1 Проектный облик детектора ИК ОЛВЭ (а), фотография сцинтиляционной сборки из аппаратуры НУКЛОН (б).

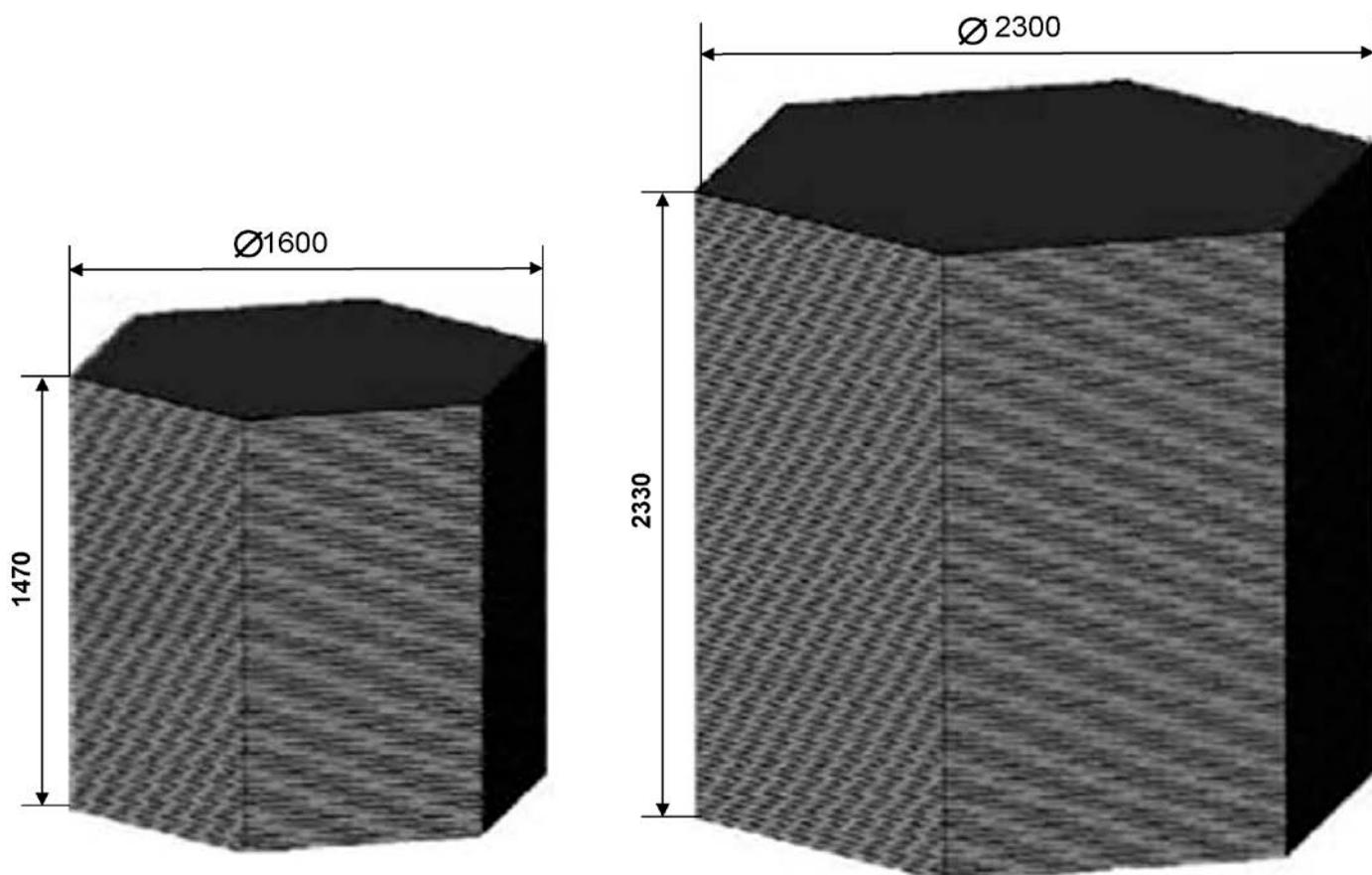


Рис.2 Сборка детекторов ИК ОЛВЭ массой 10 тонн (а), массой 30 тонн (б).

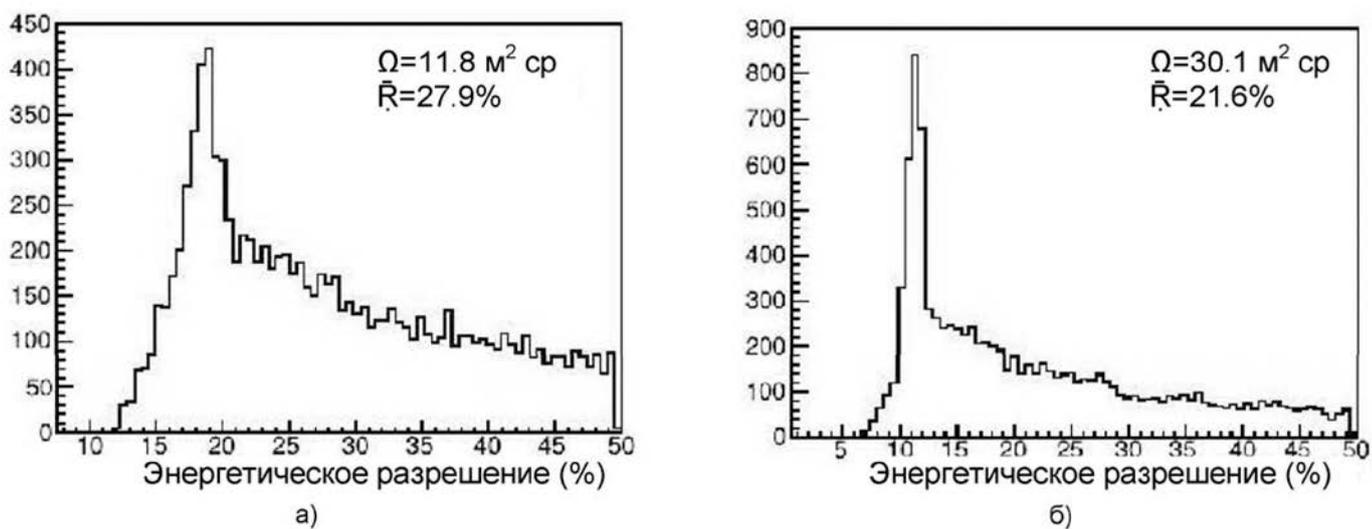


Рис. 3 Эффективный геометрический фактор и распределения энергетического разрешения для протонов, при калориметре 10 тонн (а) и 30 тонн (а).

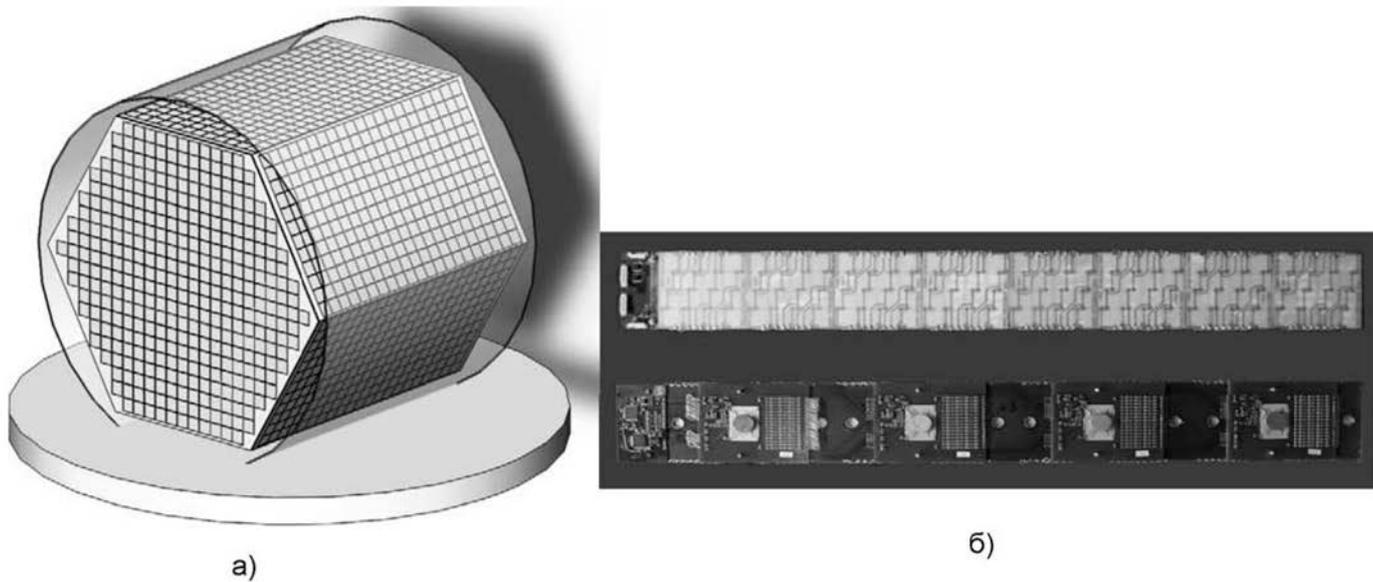


Рис. 4 Проектный облик системы измерения заряда аппаратуры ОЛВЭ а), фотография лидера аппаратуры НУКЛОН б).

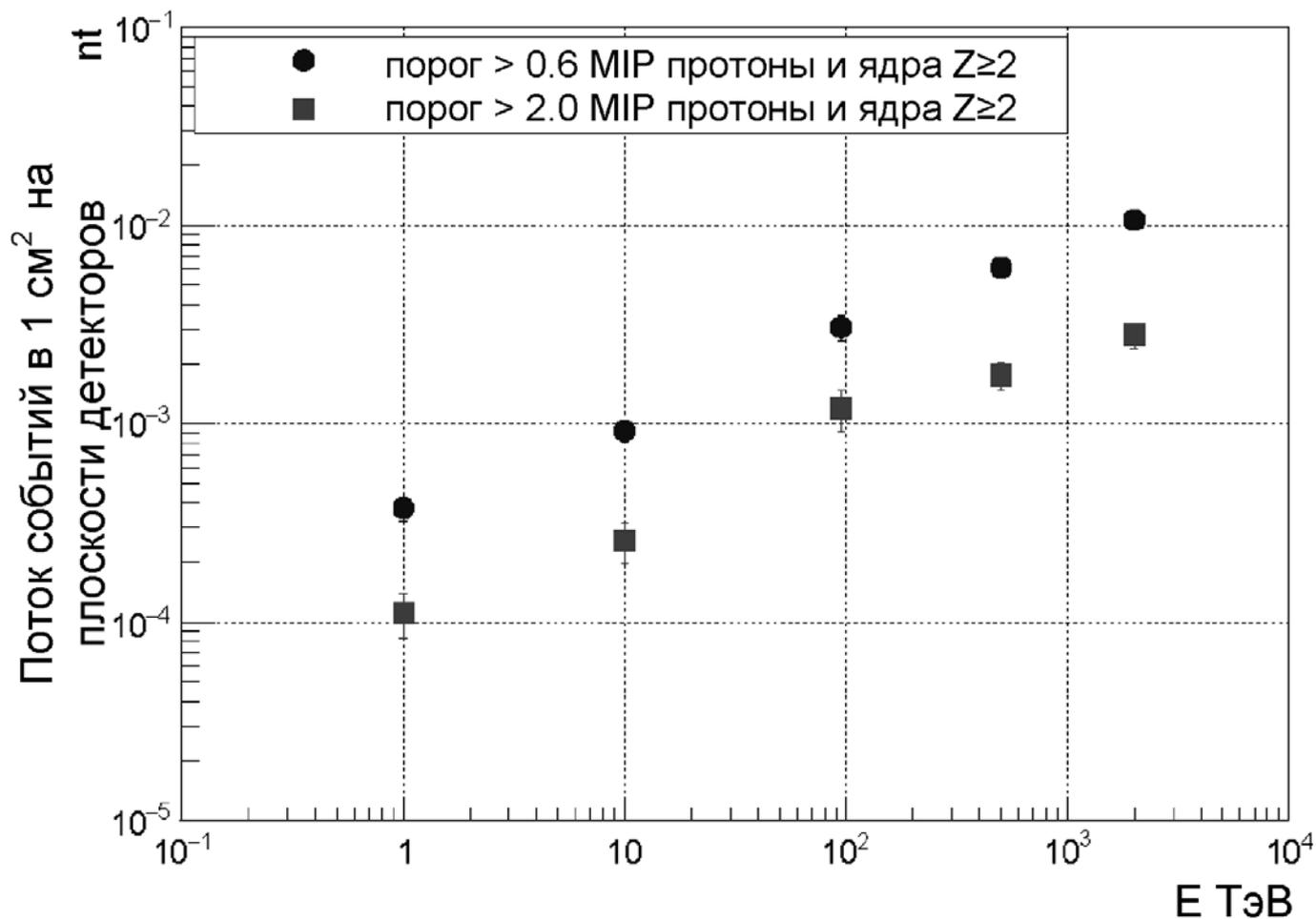


Рис. 5 Вероятность регистрации частицы обратного тока в пад детектора заряда площадью 1 см² при пороге в 0.6 MIP (MIP однозарядная релятивистская частица) при регистрации протонов, и при пороге 2.0 MIP при регистрации ядер с $Z \geq 2$.

Количество электронных каналов и энергопотребление 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

Табл. 2

Ежедневный объем данных ОЛВЭ в зависимости от массы калориметра

Масса калориметра	10 т	30 т
Энергетический порог (>300 ГэВ) Гб/сутки	800	2400
Энергетический порог (>1000 ГэВ) Гб/сутки	100	300

Табл. 3

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

Е эВ	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	$5 \cdot 10^{15}$	10^{16}
10 т 5 лет	$5.1 \cdot 10^8$	$1.1 \cdot 10^7$	$2.4 \cdot 10^5$	$4.4 \cdot 10^3$	$2.0 \cdot 10^2$	46
10 т 7 лет	$7.1 \cdot 10^8$	$1.5 \cdot 10^7$	$3.5 \cdot 10^5$	$6.1 \cdot 10^3$	$2.8 \cdot 10^2$	65
30 т 5 лет	$1.3 \cdot 10^9$	$2.7 \cdot 10^7$	$6.9 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^4$	$5.1 \cdot 10^2$	117
30 т 7 лет	$1.8 \cdot 10^9$	$3.8 \cdot 10^7$	$9.0 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^4$	$7.2 \cdot 10^2$	164

Табл. 4

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

Е эВ	$3 \cdot 10^{11}$	10^{12}	$3 \cdot 10^{12}$	10^{13}
10 т 5 лет	$2.3 \cdot 10^6$	$1.2 \cdot 10^5$	$4.4 \cdot 10^3$??
10 т 7 лет	$3.3 \cdot 10^6$	$1.7 \cdot 10^5$	$6.2 \cdot 10^3$??
30 т 5 лет	$5.9 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^5$	$1.1 \cdot 10^4$??
30 т 7 лет	$8.2 \cdot 10^6$	$4.4 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^4$??

Табл. 4

Ожидаемая статистика в зависимости от массы ИК и времени экспозиции, диффузные гамма-

кванты для средних галактических широт 10° - 30°

Е эВ	$3 \cdot 10^{11}$	10^{12}	$3 \cdot 10^{12}$	10^{13}
10 т 5 лет	$1.5 \cdot 10^4$	$2.6 \cdot 10^3$	$6.2 \cdot 10^2$	149
10 т 7 лет	$2.0 \cdot 10^4$	$3.7 \cdot 10^3$	$9.4 \cdot 10^2$	209
30 т 5 лет	$3.7 \cdot 10^4$	$6.5 \cdot 10^3$	$1.7 \cdot 10^3$	379

30 т 5 лет	$5.1 \cdot 10^4$	$9.1 \cdot 10^3$	$2.4 \cdot 10^3$	530
------------	------------------	------------------	------------------	-----