

УДК 524.1

ПРОЕКТ НАЗЕМНОГО ШИРОКОУГОЛЬНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАССОВОГО СОСТАВА ПЕРВИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ 1–1000 ПэВ

© 2026 г. Д. В. Чернов^{1, *}, Е. А. Бонвеч^{1, **}, О. В. Черкесова², Е. Л. Энтина¹, В. И. Галкин³,
В. А. Иванов³, Т. А. Колодкин³, В. И. Оседло¹, Н. О. Овчаренко³,
Д. А. Подгрудков³, Т. М. Роганова¹, М. Д. Зива⁴

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

²Факультет космических исследований Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Факультет вычислительной математики и кибернетики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: chr@dec1.sinp.msu.ru

**E-mail: bonvech@yandex.ru

В этой работе представлен проект нового детектора, предназначенного для определения химического состава первичных космических лучей на основе характеристик углового распределения черенковского света от ШАЛ. Установка, состоящая из нескольких таких детекторов, сможет регистрировать отдельные события ШАЛ в диапазоне энергий от 1 до 1000 ПэВ с высоким угловым разрешением до 0.2°. Отличительной особенностью предлагаемого детектора является его простая конструкция и широкий угол обзора более 30° при сохранении относительно малого числа измерительных каналов.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, детектор, черенковский свет

DOI: 10.56304/S2079562926010069

1. ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на большое количество установок, работающих в районе “колена” [1–4], задача определения химического состава первичных космических лучей (ПКЛ) еще не решена в полной мере [5, 6]. Методологическая точность не позволяет проводить индивидуальную классификацию зарегистрированных событий. Наиболее часто используемый параметр, $X_{\max}$, дает представление только об общей тенденции к облегчению или утяжелению композиции [7, 8]. Однако этот подход не дает однозначного ответа относительно того, какая из групп ядер p-He, CNO или Fe ответственна за конкретное изменение среднего значения $X_{\max}$.

В попытке решить эту проблему для улучшения разделения групп ядер была использована комбинация методов, включающих детекторы черенковского света и детекторы частиц, такие как TAIGA [4]. Тем не менее, опора на регистрацию заряженных частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ)

неизбежно приводит к существенной зависимости интерпретации результатов от исходной модели, используемой для моделирования ШАЛ. В то же время метод детектирования черенковского света (ЧС) имеет значительно меньшую степень зависимости от модели, поскольку он предоставляет информацию обо всех стадиях развития каскада частиц в атмосфере, включая черенковские фотоны, испускаемые первичной частицей. Хотя непосредственно обнаружить свет первичной ча-

Таблица 1. Параметры прототипа детектора

Угол обзора	$\pm 28^\circ$ или $\pm 36^\circ$
Угловое разрешение	0.2–0.4°
Фокусное расстояние	1.2–1.6 м
Диаметр конструкции	1.5–2 м
Количество пикселей (виртуальных пикселей в 37-линзовом варианте)	259 (~9000) или 427 (~15000)
Эффективная апертура	320 см ²

стицы практически невозможно, но можно использовать угловое распределение ЧС. Измерение этого распределения позволяет лучше идентифицировать тип первичной частицы, поскольку оно также содержит информацию о различных стадиях развития каскада. Этот метод особенно эффективен в астрофизических гамма-телескопах, где использование параметров Хилласа [9] позволяет выделять гамма-кванты на фоне адронной компоненты.

Однако, прямой перенос методов из гамма-астрономии в изучение космических лучей сопряжен с рядом технических и методических проблем. Создание детекторов космических лучей высоких энергий требует создания сложных распределенных в пространстве сетей детекторов, работающих в условиях фона, включая фон космических лучей меньших энергий. Также, каждый элемент сети детекторов также должен быть широкоугольным. Оба условия (площадь и угол обзора) требуются для обеспечения большого геометрического фактора, необходимого для изучения КЛ в районе “колена”. При этом, для методов анализа углового распределения ЧС требуется относительно высокое разрешение детектора, что очень сильно усложняет конструкцию каждой отдельной станции. Для решения этой задачи, мы предлагаем новый тип детектора.

2. ПРИНЦИП РАБОТЫ ДЕТЕКТОРА

Для регистрации ЧА ШАЛ в области 1–1000 ПэВ могут применяться относительно небольшие детекторы, т.к. для первичного протона с энергией 1 ПэВ плотность фотонов на расстоянии порядка 100 м от оси вертикального ливня уже выше 10 фотон/см². Для надежной регистрации ливня, с учетом потерь на элементах конструкции и оптики детектора (включая квантовую эффективность фотоприемника), требуется не менее 1000 фотонов. Для прототипа установки планируется использовать линзы диаметром около 22 см и площадью 400 см². Однако в традиционной конструкции телескопа для обеспечения широкого угла обзора требуется камера с большим числом регистрирующих ячеек (пикселей). С другой стороны, т.к. шансы на практически одновременный (в пределах микросекунды) приход двух ливней с энергией выше 1 ПэВ на ограниченную область крайне малы, мы предлагаем конструкцию детектора с небольшой матрицей с 300–500 пикселями, каждый из которых может регистрировать свет, проходящий с нескольких различных направлений.

Предварительные оценки показали принципиальную возможность создания такого детектора. На рис. 1 приведена предварительная версия оптической схемы детектора с угловым разрешением 0.24° и фокусным расстоянием 1550 мм, иллюстрирующая оптические пути лучей через 4 линзы. Т.к. оптическая часть детектора планируется симметричной (общий вид приведен на рис. 2), полный угол обзора детектора будет более 56°. В верхнем правом углу оранжевым обозначен фотоприемник диаметром 285 мм. Всего, 37 одинаковых плоско-выпуклых линз формируют светособирающую поверхность. Каждая линза собирает свет на фотоприемник из разных областей полного поля зрения детектора. Чтобы уменьшить влияние краевых эффектов и получить непрерывное поле обзора всего детектора, поля зрения отдельных линз частично перекрываются. На рис. 1 утолщенными красными и синими линиями показаны два параллельных световых пучка, падающих на соседние линзы. Точки сбора этих пучков расположены на противоположных краях фотоприемника. Количество линз, а следовательно, и полный угол обзора, может быть увеличено на еще один пояс линз (всего 61 линза), обеспечивая 72-градусное поле зрения. Если заменить линзы на блоки из двух линз и увеличить их количество, то можно еще расширить поле зрения, доведя его до практически 1.8 ср. Дальнейшее расширение поля зрения становится существенно более трудоемким.

Фотоприемник детектора состоит из 61 оптического сегмента. Каждый сегмент состоит из 7 кремниевых фотоумножителей размером 6×6 мм и линзовых светосборников над ними, расположенных в форме заполненного шестиугольника. Расстояние между центрами соседних пикселей составляет около 12 мм. Изменение размера камеры при сохранении параметров линзовой части детектора меняет поле зрения отдельной линзы. Изменение плотности расположения пикселей меняет оптическое разрешение детектора.

Так же прорабатывается вариант похожего детектора, но с угловым разрешением 0.33°, полем обзора ±20° и фокусным расстоянием 1600 мм. Во всех вариантах детектора используется один и тот же оптический сегмент.

Сам оптический сегмент основан на SensL MicroFC-60035 SiPM с чувствительной областью 5.96×5.96 мм². Ранее был разработан похожий оптический сегмент из 7 SiPM [10]. Первый прототип фотоприемника из 7 сегментов (всего 49 пикселей) был собран и испытан в конце 2018 г. С сентября 2019 г. эта камера была установлена в прототип малого широкоугольного телескопа (Small Imaging Telescope, SIT) и успешно интегрирована в астрофизический комплекс TAIGA [11, 12].

3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ К ТИПУ ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ

Для анализа угловых распределений черенковского света ШАЛ и исключения адронного фона в гамма-астрономии традиционно исполь-

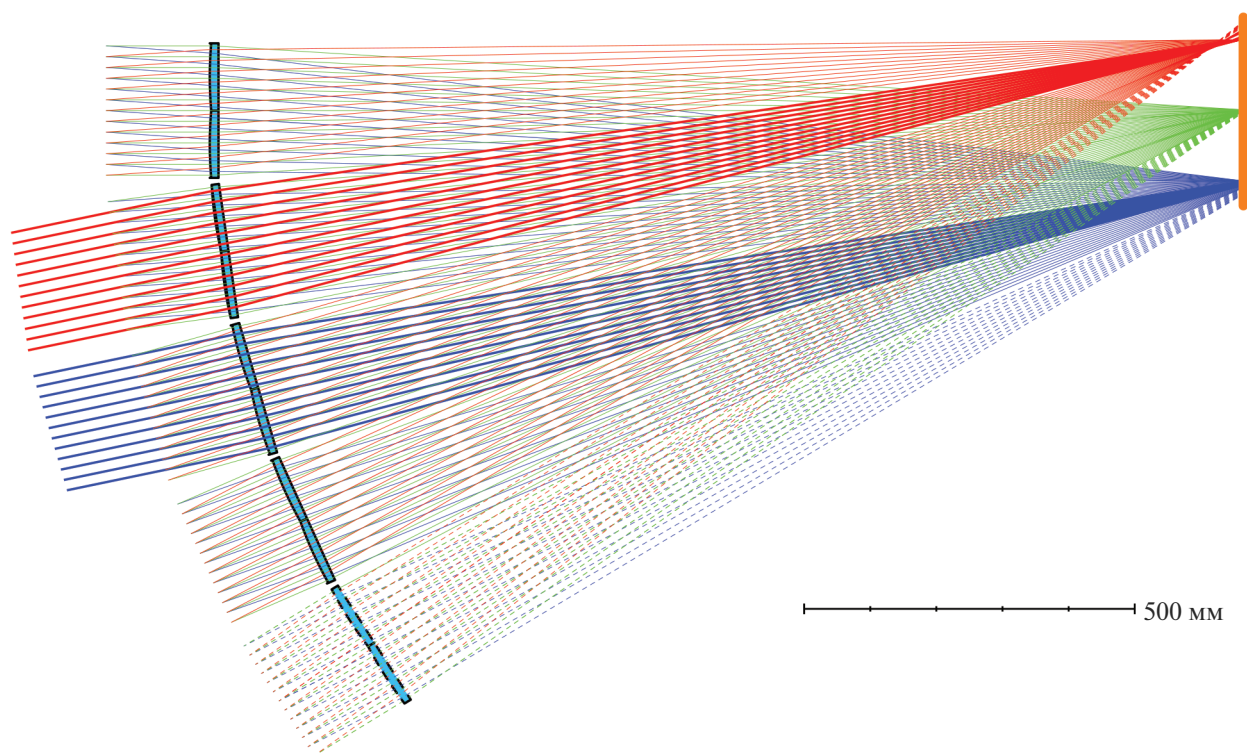


Рис. 1. Оптическая схема предлагаемого детектора, оранжевым показана светочувствительная камера, голубым отмечены линзы. Каждая линза наклонена на 8° относительно соседей. Цвет лучей обозначает относительный угол падения пучка: синий — -4° , зеленый — 0° , красный — $+4^\circ$. Утолщенными линиями показаны два параллельных пучка (наклон 12° к оси детектора), которые попали на разные линзы и сфокусированы на разных краях светочувствительной поверхности. Пунктирная линия обозначает возможное расширение поля зрения детектора.

зуется ряд параметров (параметры Хилласа [9]). Однако, эффективные площади зеркал гамма-телескопов измеряются десятками квадратных метров, что обеспечивает нижний порог регистрации на уровне 100 МэВ. Прямая применимость используемых в гамма-астрономии методов для энергий в районе 1–10 ПэВ требует более тщательного анализа. Однако, ранее был разработан набор методов для определения массового состава КЛ в области высоких энергий для высокоэнергетических условий [13–16]. Адаптация этих методов для большей глубины в атмосфере сделана в рамках проекта СФЕРА-3 [17, 18].

Предварительно, моделирование показывает что предложенный детектор может разделять регистрируемые события на несколько групп, при условии, что есть дополнительные данные о ливне, помимо углового распределения (см. раздел. 5).

4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОРОГ РЕГИСТРАЦИИ

Для оценки энергетического порога регистрации ШАЛ требуется оценить соотношение сигнал-шум в каналах детектора с учетом того, что

полезный сигнал в световое пятно собирает одна линза (даже если линз работает несколько, пятно будет по числу линз, одна линза формирует одно пятно), а фон собирают постоянно все линзы. Полагая фон ночного неба равным $2 \cdot 10^{12}$ фотонов $\text{м}^{-2} \text{ср}^{-1} \text{с}^{-1}$, то поток фотонов, падающих на 1 пиксель 0.24° ($1.38 \cdot 10^{-5} \text{ср}$) через 320 см^2 каждой из 37 линз, составит менее 8 штук за 200 нс (характерное проектируемое время интегрирования сигнала). Полагая эффективность регистрации фотонов SiPM для фотонов неба около 25%, флуктуации фона составят порядка 2–3 фотоэлектронов.

Однако, более точную оценку фона можно получить из телеметрии прототипа детектора SIT в Тункинской долине [11]. С учетом абсолютной калибровки [19], полный регистрируемый ток с камеры SiPM (данные индивидуальных пикселей недоступны) можно конвертировать в поток фотоэлектронов, который для некоторых средних условий (суточные и годовые вариации, связанные с анизотропией фона неба) составляет $1.78 \cdot 10^9$ фотоэлектронов/с (кросс-токи SiPM уже вычтены).

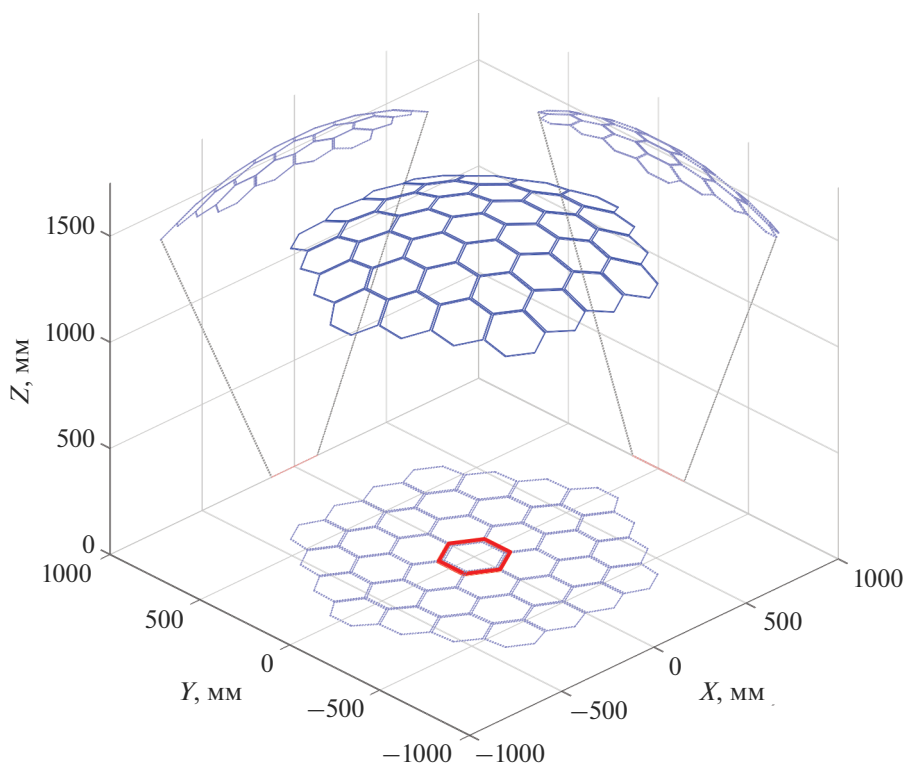


Рис. 2. Общий вид оптической части детектора. Сплошными линиями показаны сами элементы, пунктиром — проекции (даны для наглядности). Синим показаны линзы, красным — фотоприемник. Темно-серыми пунктирными линиями показана боковая поверхность детектора, убранная в основном изображении.

В пересчете на пиксель этот поток составляет $3.7 \cdot 10^7$ фотоэлектронов/с. Эта оценка является более точной, т.к. включает в себя реальную спектральную зависимость SiPM и реальный спектр ночного неба.

С учетом разницы в эффективной апертуре (SIT — 367 см^2 , этот проект — $\sim 320 \text{ см}^2$) и размерах пикселя (SIT — 1.5° , этот проект — $\sim 0.05^\circ$) ожидаемое число фоновых фотоэлектронов составит 0.2 за 200 нс, что делает фон неба пренебрежимо малым с точки зрения реконструкции событий. Для работы триггерной системы в сочетании с кросс-токами SiPM такой уровень фона представляет собой существенную сложность. Существует несколько способов решить эту проблему (см. [20]), даже для более сложного случая длинного во времени полезного сигнала и более высокого фона.

Такое же сравнение с данными SIT [12] позволяет оценить и энергетический порог регистрации планируемого детектора, являющегося аналогичным SIT по апертуре и типу светочувствительных элементов. При этом, т.к. ЧС от ШАЛ имеет узкое угловое распределение на небольших расстояниях от оси ливня (менее 200–300 м), то большая часть фотонов будет собираться в 3–5 пик-

селей. У прототипа SIT был большой пиксель (почти 2°), что приводило к сбору почти половины света от ШАЛ в один пиксель. При таких условиях порог регистрации составил около 0.3 ПэВ (оценка из сравнения событий, зарегистрированных совместно с HiSCORE). Для нового детектора, при несколько меньшей апертуре и более высоком разрешении (распределение фотонов по большему числу пикселей) порог регистрации составит около 1 ПэВ. Однако, только полное Монте-Карло моделирование позволит корректно оценить этот порог, а также выработать необходимое триггерное условие для успешной регистрации ШАЛ.

Стоит заметить, что масштабирование детектора в 2 раза по размерам может понизить порог регистрации до 250–300 ТэВ.

5. ПРИМЕНИМОСТЬ НОВОГО ДЕТЕКТОРА

Предложенная схема детектора, при всех ее достоинствах имеет ряд ограничений. Т.к. каждый отдельный пиксель осматривает одновременно несколько отдельных участков неба (по одному участку на каждую линзу), то при регистрации события невозможно точно указать через какую линзу был собран свет. А, значит, невозможно корректно

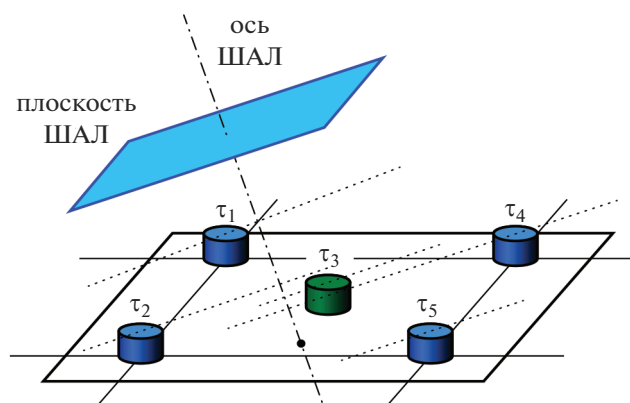


Рис. 3. Массив из нескольких детекторов. Зеленым указан основной детектор, синим обозначены места для выносных пунктов (только вспомогательные данные о времени прихода ШАЛ). На месте синих детекторов, могут быть такие как и основной детектор, либо детекторы сторонней установки. Расстояние между детекторами около 100–200 м.

указать направление прихода первичной частицы, что препятствует корректной оценки ее энергии и типа.

Можно предложить несколько способов обхода данного ограничения. Одним из вариантов является интегрирование данного детектора в другой массив детекторов ШАЛ и использовать его данные о направлении и положению оси. Направление прихода ШАЛ и направление прихода ЧС от ШАЛ несколько различаются, но конструкция предлагаемого детектора не требует высокой точности внешних данных (нужно лишь выбрать одно из направлений, отстоящих друг от друга на 8°). Однако, в этой схеме включения детектора можно использовать внешние данные о ШАЛ для более точной оценки энергии и типа первичной частицы, по сути реализуя гибридную схему регистрации.

Другим вариантом решения проблемы является оборудование детектора выносными пунктами. Эти пункты, отстоящие от основного детектора на 100–200 м, не чувствительные к угловому распределению, будут регистрировать только время прихода света, необходимое для оценки направления прихода ШАЛ. В случае чуть более сложного устройства, эти выносные пункты могут также регистрировать количество пришедшего света и использоваться для определения положения оси ливня. Расположения пунктов в этом варианте приведено на рис. 3. Зеленым показан основной детектор, синим – выносные пункты.

Этот подход можно развить дальше и вместо выносных пунктов установить дополнительные

детекторы той же конструкции, что и основной. Это даст данные о направлении прихода ливня (из времени регистрации), о положении оси (можно предложить несколько методов), а также существенно увеличит количество данных о ливне, то позволит точнее определить тип первичной частицы.

Такая множественная регистрации одного ливня в нескольких различных точках (аналог стереорежима многих гамма-установок) также позволяет развить и более сложные методы анализа данных, т.к. угол между направлениями прихода ЧС и частицы зависит от энергии, типа и расстояния до оси.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена конструкция широкоугольного телескопа с высоким угловым разрешением для изучения массового состава КЛ в области “колена”. Параметры оптической схемы позволяют применять существующие методики анализа углового распределения ЧС ШАЛ. Оценка фона указывает на возможность регистрации событий ШАЛ с энергиями 1 ПэВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Крымской Астрофизической обсерватории и Института астрономии РАН за предоставление площадок в Симеизе для тестирования прототипа детектора. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В.Ломоносова

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Garyaka A.P. et al. // *Astropart. Phys.* 2007. V. 28 (2). P. 169. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2007.04.004>
2. Kampert K.-H., Unger M. // *Astropart. Phys.* 2012. V. 35 (10). P. 660. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.02.004>
3. Apel W.D. et al. // *Astropart. Phys.* 2012. V. 36 (1). P. 183. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2012.05.023>
4. Budnev N. et al. // *JINST.* 2020. V. 15 (09). P. 09031. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/c09031>
5. Schröder F.G. et al. // *BAAS.* 2019. V. 51 (3). P. 131. <https://baas.aas.org/pub/2020n3i131>
6. Schröder F.G. // *PoS(ICRC2019).* 2019. V. 358. P. 030. <https://doi.org/10.22323/1.358.0030>
7. Yushkov A. et al. // *EPJ Web of Conf.* 2019. V. 210. P. 01009. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921001009>
8. Omura Y. et al. // *PoS(ICRC2021).* 2021. V.395. P. 329. <https://doi.org/10.22323/1.395.0329>
9. Hillas A.M. // *Space Sci. Rev.* 1996. V. 75 (1/2). P. 17. <https://doi.org/10.1007/BF00195021>

10. Bonvech E. et al. // J. Phys. Conf. Ser. 2019. V. 1181. P. 012025.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1181/1/012025>
11. Chernov D. et al. // JINST. 2020. V. 15 (09). P. 09062.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/c09062>
12. Podgrudkov D.A. et al. // Bull. Rus. Acad. Sci.: Phys. 2021. V. 85 (4). P. 408.
<https://doi.org/10.3103/s1062873821040286>
13. Borisov A.S. et al. // Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro. 2013. P. 0953.
14. Galkin V.I. et al. // EPJ Web of Conf. 2017. V. 145. P. 15004.
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201714515004>
15. Galkin V.I. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2018. V. 73 (2). P. 179.
<https://doi.org/10.3103/S0027134918020078>
16. Bakhromzod R., Galkin V.I. // NIM A. 2021. V. 1018. P. 165842.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165842>
17. Chernov D.V. et al. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (6). P. 641.
<https://doi.org/10.1134/S1063778822060059>
18. Chernov D.V. et al. // Phys. At. Nucl. 2024. V. 87 (S2). P. S319.
<https://doi.org/10.1134/S1063778824700959>
19. Amineva A.A. et al. // Memoirs Fac. Phys. 2023. V. 2023 (4). P. 2341602
20. Entina E.L. et al. // Moscow Univ. Phys. Bull. 2024. V. 79 (Suppl. 2). P. S676.
<https://doi.org/10.3103/S0027134924702126>

The Project of a Ground-Based Wide-Angle EAS Cherenkov Light Imaging Detector for PCR Mass Composition Study in the 1–1000 PeV Energy Range

**A. A. Amineva^{a, *}, D. A. Podgrudkov^{a, b}, D. V. Chernov^a, E. A. Bonvech^{a, **}, O. V. Cherkasova^{a, b},
E. L. Entina^a, V. I. Galkin^{a, c}, V. A. Ivanov^{a, c}, T. A. Kolodkin^{a, c}, V. I. Osedlo^a, N. O. Ovcharenko^{a, c},
D. A. Podgrudkov^{a, c}, T. M. Roganova^a, and M. D. Ziva^{a, d}**

^a*Skobeltsyn Institute for Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^b*Department of Space Research, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^c*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

^d*Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*e-mail: chr@dec1.sinp.msu.ru

**e-mail: ANMoroz@mephi.ru

This report presents a draft of a new detector designed to determine the chemical composition of primary cosmic rays based on the characteristics of the angular distribution of Cherenkov light from EAS. The installation, consisting of several such detectors, will be able to register individual EAS events in the energy range from 1 to 1000 PeV with high angular resolution of up to 0.2° . The proposed detector's distinctive feature is its simple design and wide viewing angle of above $\pm 30^\circ$.

Keywords: extensive air showers, detector, Cherenkov light