

М.Н. Дьяконов, С.П. Кнуренко, В.А. Колосов, И.Е. Слепцов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЗРАЧНОСТИ НИЖНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ ПО ОСЛАБЛЕНИЮ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

Описывается метод определения прозрачности приземного слоя атмосферы толщиной до 6–7 км для источника света со спектром $d^2W/d\lambda d\lambda \sim 1/\lambda^3$, каким является излучение Вавилова-Черенкова заряженных частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ), образованных в результате взаимодействия космических лучей с атомами воздуха.

Приводятся значения среднего коэффициента пропускания слоя атмосферы в интервале длин волн $\lambda_1 + \lambda_2 = 300 - 800$ нм при благоприятных для оптических наблюдений условий на Якутской комплексной установке широких атмосферных ливней.

1. Введение

Центральная Якутия представляет собой регион с резкоконтинентальным климатом, где перепад температур от зимы к лету может достигать $\sim 100^\circ\text{C}$. Летом температура нередко превышает плюс $30-35^\circ\text{C}$, а зима отмечается постоянством низких температур, обычно минус $35-50^\circ\text{C}$, и незначительными осадками в виде снега. Из-за длительных низких температур (зима длится 5–6 месяцев) в зимний период атмосфера в центральной Якутии становится практически «вымороженной», т. е. свободной от водяных паров. Этот факт, а также отсутствие мощных промышленных источников загрязнения воздушной среды в этом районе благоприятствуют проведению оптических измерений.

С начала 70-х годов на Якутской комплексной установке [1] широких атмосферных ливней (ШАЛ) проводится регистрация в оптическом диапазоне излучения Вавилова-Черенкова (черенковский свет), создаваемого в атмосфере каскадом заряженных релятивистских частиц, которые образовались в результате взаимодействия космических лучей с ядрами атомов воздуха.

Для корректного перехода от измеряемых на установке параметров атмосферного черенковского света ШАЛ к характеристикам первичного космического излучения [2] требуется оценка суммарной потери света на всем пути его распространения. Такая оценка была получена с помощью способа, использующего в качестве источника света само излучение Вавилова–Черенкова, которое ослабляется атмосферой на пути к приемнику света.

2. Экспериментальная установка

На Якутской установке широких атмосферных ливней одновременно регистрируется электронная, мюонная компоненты и черенковский свет ливня. На рис. 1 приведен план установки, которая состоит из 59 станций наблюдения. База между станциями наблюдения составляет 0,5 и 1 км. Регистрация черенковского света происходит в случае совпадения двух сигналов рядом расположенных сцинтилляционных счетчиков с черенковским импульсом, что подтверждает принадлежность данного оптического сигнала к ливневому событию и уменьшает вероятность ложных срабатываний в случае увеличения фонового свечения ночного неба. Вся информация о ливне накапливается в автономной памяти каждой станции и по специальной команде передается в центр установки (комплекс КА-МАК + ЭВМ СМ-3), где обрабатывается и хранится на магнитных носителях.

Приемником черенковского излучения служат фотоэлектронные умножители типа ФЭУ-49Б и ХР-2041, чувствительность и спектральные характеристики которых соответствуют требованиям, предъявляемым при измерениях черенковского света.

Конструкция черенковского детектора выполнена в виде металлического бака с вертикальным расположением ФЭУ фотокатодом вверх. Крышка детектора автоматически открывается и закрывается по команде из центра установки, обеспечивая достаточную светоизоляцию в дневное время. В зимнее время, для исключения попадания пыли, снега и зашндевения фотокатода применяется обдув фотокатода теплым воздухом. Конструкция детектора рассчитана на работу без дополнительной оптики и может находиться в рабочем состоянии круглый год.

Делитель напряжения и режим работы ФЭУ подбирался с учетом работы при повышенном токе (базовое сопротивление делителя $R = 40 - 100$ кОм), обусловленном изменяющимся во времени фоном ночного неба. Регулируемая фоновая загрузка не превышала 1000 Гц и постоянно отображалась в цифровом виде и записывалась на бумаге с помощью быстрого самописца. Амплитуда черенковского импульса регистрировалась восьмиразрядным АЦП, работающим на контур ударного возбуждения

с частотой 500 кГц [;4]. Во избежание наложения на основной сигнал шумов, обусловленных флуктуациями свечения ночного неба и собственных шумов ФЭУ, применялась импульсная блокировка ФЭУ. Принцип ее действия описан в работе [5].

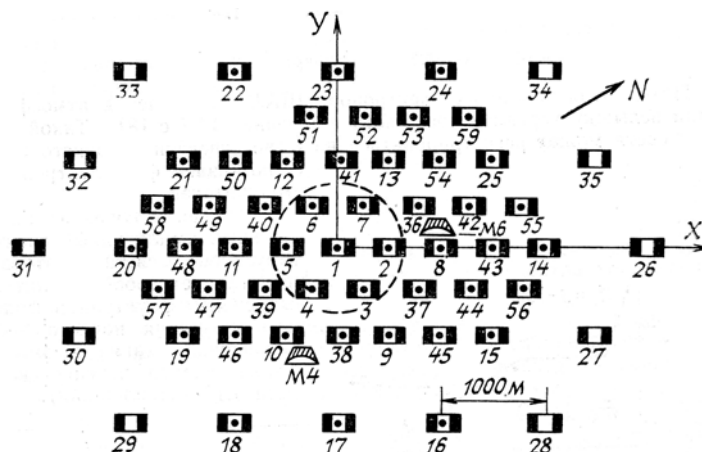


Рис. 1. План расположения станций наблюдения Якутской комплексной установки ШАЛ. Станции № 1–25 имеют по 2 сцинтилляционных счетчика с площадью 2 м² каждый и 1 приемник черенковского света с одним ФЭУ; станции № 26–35 – без приемников черенковского света; станции № 36–54 – приемник черенковского света с тремя ФЭУ

Оперативный контроль за работой электроники черенковского канала производился непрерывно по фону ночного неба и периодически с помощью тестового сигнала из центра установки для общей проверки состояния всех каналов. Калибровка черенковского канала осуществлялась с привлечением эталонного блока пластического сцинтиллятора (отградуирован в числе фотонов на квадратный метр) в периоды перед началом и после окончания сеанса наблюдения [6].

Управление работой установки, сбор, хранение и обработка всей информации осуществлялись в центре установки комплексом аппаратуры, выполненной на базе конструктивов КАМАК в сочетании с электронно-вычислительными машинами типа «Электроника-60», СМ-3, СМ-4, работающими в непрерывном режиме [7].

3. Метод контроля прозрачности атмосферы

Поток релятивистских электронов ШАЛ вызывает в атмосфере Земли вспышку черенковского света в течение 10⁻⁷ с [8]. Такой импульс света может регистрироваться на фоне свечения ночного неба с помощью фотоэлектронных умножителей.

На рис. 2 показан интегральный амплитудный спектр импульсов света, который представляет собой амплитудный спектр флуктуаций фонового излучения ночного неба (штриховая линия) и амплитудный спектр черенковского света ШАЛ (сплошная).

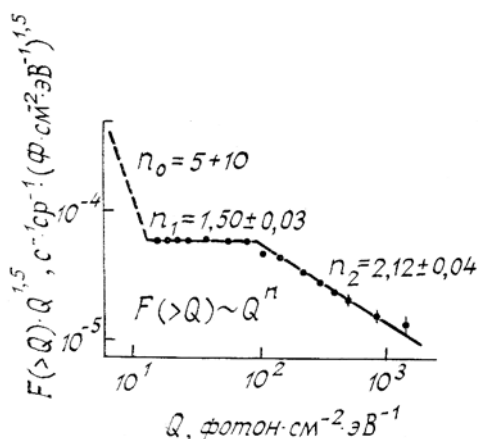


Рис. 2. Интегральный спектр амплитуд импульсов света. Точки – экспериментальные данные [9]

Для количественного описания вида интегрального спектра используется степенное приближение $F(>Q_{пор}) \sim Q^{-n}$, где $F(>Q_{пор})$ – интегральная частота импульсов, амплитуды которых больше пороговой $Q_{пор}$; n – показатель наклона спектра. В этом случае спектр фона ночного неба может быть описан с $n = 5 \div 10$.

Согласно [9] интегральный спектр при амплитуде $Q_0 \leq 100$ фотонов $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, претерпевает излом. Этот излом характеризуется следующими значениями показателя спектра:

$$\begin{aligned} n_1 &= 1,50 \pm 0,03 \text{ при } Q < Q_0 \\ n_2 &= 2,12 \pm 0,04 \text{ при } Q > Q_0, \end{aligned}$$

и объясняется природой первичного космического излучения.

С применением быстрой техники становится возможным достаточно уверенно выделять область интегрального спектра амплитуд черенковского света и затем использовать его для контроля оптического состояния атмосферы в нижней ее части, начиная с 6–7 км от поверхности Земли [3].

В предлагаемом методе высота эффективной генерации света x_m считается известной. Измеряя интегральную частоту световых импульсов за определенный промежуток времени и соотнося ее с максимально возможной частотой, которая реализуется в периоды наилучшей прозрачности атмосферы, можно найти относительную прозрачность по следующей формуле:

$$T_{\text{изм}} = \left[\frac{F_i(>Q_{\text{пор}})}{F_k(>Q_{\text{пор}})} \right]^{1/n}. \quad (1)$$

Здесь $F_i(>Q_{\text{пор}})$ и $F_k(>Q_{\text{пор}})$ – интегральные частоты импульсов черенковского света ШАЛ, превышающих заданный порог регистрации за определяемый и наилучший калибровочный в смысле прозрачности период наблюдений; n – показатель степени интегрального спектра импульсов черенковского света ШАЛ (см. рис. 2).

Для определения абсолютной прозрачности атмосферы необходимо знать реальные потери света в калибровочную ночь. Нами предполагалось, что в такую ночь потери света на аэрозолях минимальны и составляют половину потерь от рэлеевского рассеяния света. Усредненный по длине волны λ коэффициент рэлеевского рассеяния света находится по формуле [10]:

$$\overline{K_{\text{Рэл}}(x)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_{\text{Рэл}}(x, \lambda) W(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W(\lambda) s(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

где x – глубина атмосферы в $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$, с которой приходит свет; $W(\lambda)$ – спектр излучения Вавилова–Черенкова; $s(\lambda)$ – спектральная характеристика фотоумножителя.

В данном методе коэффициент пропускания $\overline{T_{\text{Рэл}}(x_m)}$ удобнее представить как функцию глубины эффективной генерации черенковского света x_m в $\text{г} \cdot \text{см}^{-2}$ [2]. Тогда пропускание атмосферой черенковского света с учетом рэлеевского рассеяния [6] запишется в виде

$$\overline{T_{\text{Рэл}}(x_m)} = (1 - \overline{K_{\text{Рэл}}(x_m)}) = 0,90 + 0,025 \left(\frac{x_m - 700}{100} \right), \quad (3)$$

а функция пропускания света в калибровочную ночь согласно нашему предположению

$$\overline{T_{\text{кал}}(x_m)} = (0,85 \pm 0,05) + 0,04 \left(\frac{x_m - 700}{100} \right). \quad (4)$$

Окончательно абсолютная прозрачность атмосферы в зависимости от x_m и зенитного угла θ прихода света может быть представлена в виде

$$\langle T(x_m, \theta) \rangle = \langle T_{\text{изм}}(x_m, \theta) \rangle, \overline{T_{\text{кал}}(x_m, \theta)}, \quad (5)$$

где $\langle T_{\text{изм}}(x_m, \theta) \rangle$ определяется из результатов усреднения патрульных измерений интегральной частоты черенковского импульса за 15-минутные интервалы наблюдения.

4. Результаты наблюдения

Измерения $T_{\text{изм}}$ проводятся на Якутской установке с 1974 года. В первых измерениях участвовало от 5 до 13 станций наблюдений, в последующие годы установка дополнилась еще 14-ю новыми

детекторами черенковского света. Во всех случаях время набора интегрального спектра амплитуд составляло 15 мин для каждой станции наблюдения.

На рис. 3 показаны усредненные за один час 15-минутные результаты измерений относительной прозрачности атмосферы в зависимости от времени суток. Наблюдается мелкомасштабная структура изменения $T_{изм}$ в течение ночи и в целом корреляция с визуальными оценками прозрачности атмосферы (прямые линии). Как видно из рис. 3, прозрачность атмосферы может сильно изменяться в течение ночи и по абсолютной величине принимать значения даже больше 1,0, что объясняется наличием ночей с лучшей прозрачностью атмосферы, чем калибровочная ночь.

Для анализа характеристик ШАЛ и первичного энергетического спектра космических лучей требуется знать среднюю многолетнюю прозрачность атмосферы. Пример такого усреднения для данных, полученных в период с декабря 1981 г. по март 1982 г., показан на рис. 4. Здесь суммирование значений $T_{изм}$ проведено по часовым промежуткам времени, предполагая, что за это время значительных изменений оптического состояния атмосферы не происходит.

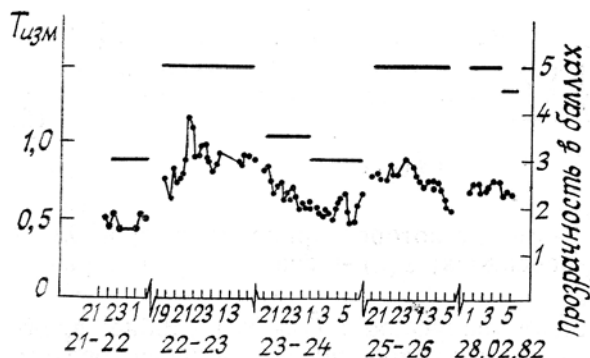


Рис. 3. Относительная прозрачность атмосферы над Якутской установкой: линии — визуальная оценка; точки — методом [3]

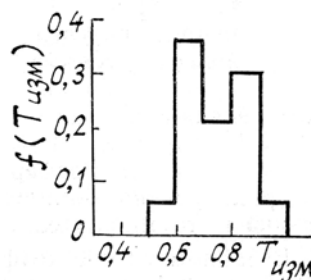


Рис. 4. Функция распределения относительной прозрачности атмосферы $f(T_{изм})$ (декабрь 1981 г. — март 1982 г.), $T_{изм} = 0,73 \pm 0,01$

Эти данные позволяют нам по описанной методике определить среднюю прозрачность нижних слоев атмосферы [2]:

$$\langle T(x_m, \theta) \rangle = (0,71 \pm 0,05) + 0,06 \left(\frac{x_m - 700}{100} \right) - 0,58 (\sec \theta - 1). \quad (6)$$

Наличие на установке большого числа светоприемников, размещенных на площади $\sim 20 \text{ км}^2$, позволяет получить не только среднюю прозрачность атмосферы, но и информацию о мелкомасштабной неоднородности оптических свойств атмосферы над отдельными станциями наблюдений.

1. Слепцов И. Е., Дьяконов М. Н., Егоров Т. А. и др. // Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1974. 192 с.
2. Дьяконов М. Н., Егорова В. П., Кнуренко С. П. и др. // Широкие атмосферные ливни с энергией выше 10^{17} эВ. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. С. 29–56.
3. Лищенко Ф. Ф. Способ определения функции пропускания атмосферы Авт. свид. № 519768. БИ. № 24. 1976.
4. Гадалов А. Н., Глушков А. В., Егоров Т. А. и др. // Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1974. С. 30–35.
5. Орлов В. А. // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1971. Т. 35. № 10. С. 2172–2174.
6. Слепцов И. Е. // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1973. Т. 37. № 7. С. 1407–1410.
7. Артамонов В. П., Егоров Т. А., Сидоров Р. Г., Слепцов И. И. // Структура и организация систем реального времени. Иркутск, 1983. С. 112–113.
8. Джелли Дж. Черенковское излучение. М.: ИЛ, 1960. 334 с.
9. Сокуров В. Ф. // Космические лучи с энергией выше 10^{17} эВ Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983. С. 61–76.
10. Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М.: Сов. радио, 1970. 495 с.

Институт космофизических исследований и аэронавтики СО АН СССР,
Якутск

Поступила в редакцию
25 февраля 1991 г.

M. N. Dyakonov, S. P. Knurenko, V. A. Kolosov, I. E. Sleptsov. **Determination of the Low Atmospheric Layers Transmission Using the Extinction of Cherenkov Radiation of Extensive Atmospheric showers.**

The method for determination of the low atmospheric layer (6 to 7 km thick) transmission using the Vavilov-

Cherenkov radiation emitted by extensive atmospheric showers and having the spectrum $\frac{d^2W}{dld\lambda} \sim \frac{1}{\lambda^3}$ is described. The showers occur due to interaction between the cosmic rays and atoms of air.

Mean values of this atmospheric layer transmission in the wavelength interval 300 to 800 nm obtained under favorable observational conditions at Yakutsk combined installation for the atmospheric showers observations are presented.