

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЮОННОГО ТЕЛЕСКОПА В АПАТИТАХ ДЛЯ ПРОВЕРКИ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОХОЖДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ

Е.А. Маурчев, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Е. А. Михалко

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

На станции нейтронного монитора г. Апатиты был разработан программный комплекс RUSCOSMICS, позволяющий решать широкий круг задач, таких как определение функции отклика детектирующего оборудования [1] или моделирования прохождения космических лучей (КЛ) через атмосферу Земли для расчета энергетических спектров вторичного излучения и скорости ионизации [2]. В задаче моделирования прохождения частиц важным этапом является верификация вычислений, выполняемая при помощи детекторов заряженных частиц, портативных [3] или установленных на шарах-зондах, предназначенных для измерения потоков вторичных КЛ вплоть до стратосферы.

В 2020 году на станции нейтронного монитора в комплексную систему мониторинга был добавлен мюонный телескоп, использующий в качестве детекторов современные сцинтилляционные пластины. В представленной работе рассмотрена методика перевода скорости счета в единицы потока излучения, необходимая для того, чтобы сравнить получаемые значения с данными моделирования.

МЕТОДИКА

Поле зрения телескопа определяется как телесный угол, под которым видна верхняя пластина из центра нижней, а его эффективной площадью - площадь верхней пластины. Телесный угол Ω определяется отношением площади S , охватываемой на сфере заданным контуром к квадрату радиуса R этой сферы.

В первом приближении $R = (O \cdot A)$, $S = a^2$. Тогда $\Omega = 2/3$. Более точное вычисление телесного угла через определение площади сферического сектора, имеющего основанием квадрат со стороной a дает значение $\Omega = 0.8$, которое и следует принимать за используемое.

Скорость счета мюонного телескопа можно выразить через формулу:

$$N = p \cdot S \cdot \Omega \cdot T,$$

где N - счет телескопа за время T , p - поток частиц в единицу времени через единичную площадь из единичного телесного угла, S - площадь пластины.

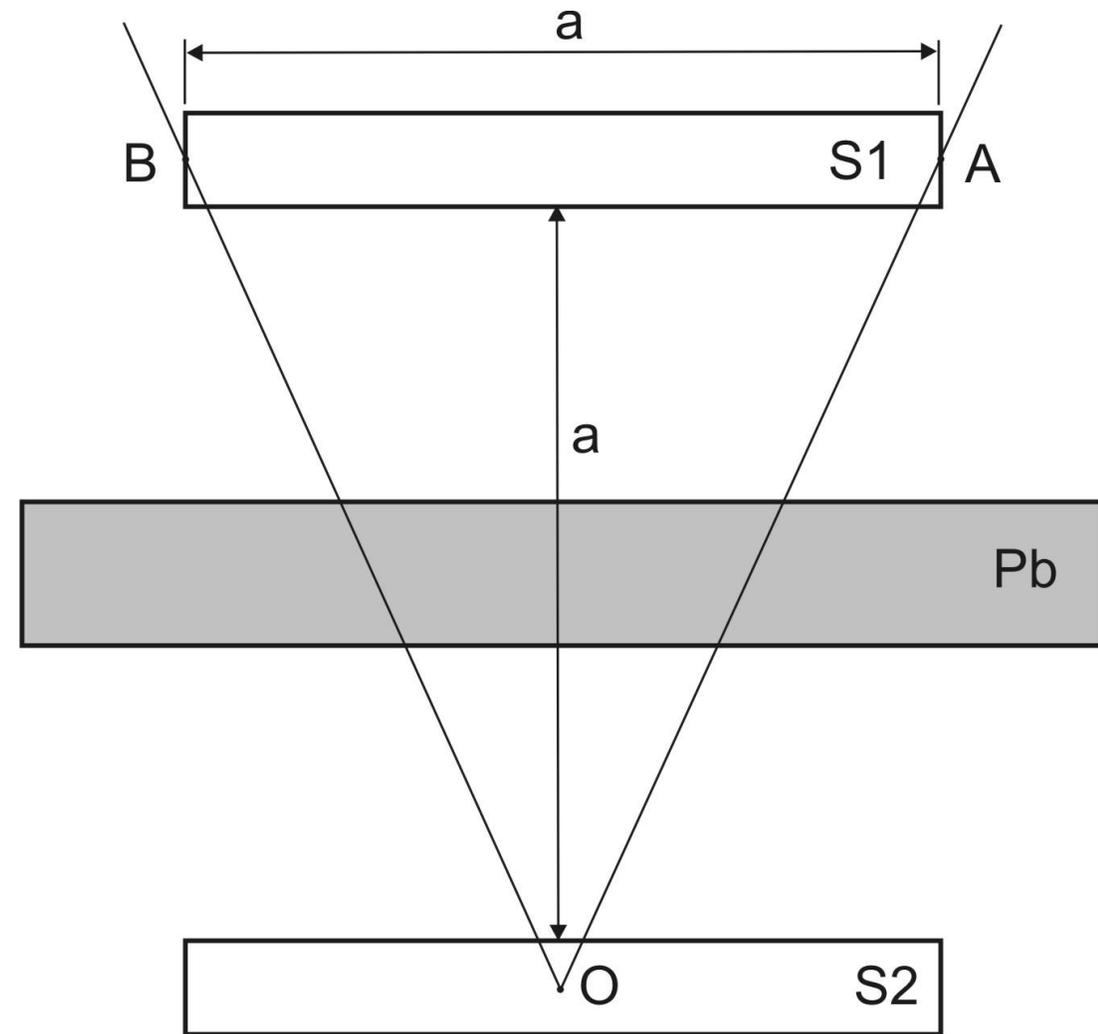


Рис. 1. Условная схема мюонного телескопа. Между сцинтилляционными пластинами S1 и S2 расположен слой свинца, выступающего в роли поглотителя.

МЕТОДИКА

Исходя из вышеописанного, можно сказать, что поток выражается как:

$$p = \frac{N}{S \cdot \Omega \cdot T}$$

Тогда, если принять за среднюю скорость счета $N = 500$ имп/мин, значение площади $S = 0,25 \text{ м}^2$, время записи счета $T = 60 \text{ с}$, то среднее значение потока через мюонный телескоп для «спокойного» времени, в отсутствие вспышек на Солнце, составит:

$$p = 500 / (0.25 \cdot 0.8 \cdot 60) = 40 \text{ частиц / (м}^2 \text{ с ср)}$$

Оценка минимальной энергии, которая необходима, чтобы мюонный телескоп зарегистрировал частицу. Основные потери энергии, которые возникают при прохождении мюонов через вещество, являются ионизационные. При этом средняя длина пробега обратно пропорциональна плотности вещества. Толщина свинцового слоя между пластинами $h_1 = 10 \text{ см}$, плотность свинца $\rho_{Pb} = 11.4 \text{ г/см}^3$. Кроме того, частице, чтобы достигнуть нижней пластины, нужно пройти верхнюю пластину. Пластиковый сцинтиллятор имеет плотность $\rho_1 \sim 1 \text{ г/см}^3$, толщина пластины $h_2 = 5 \text{ см}$. Удельные потери на ионизацию равны $\eta = 2 \text{ МэВ/г}$. Общее кол-во вещества составит:

$$F = \rho_{Pb} \cdot h_1 + \rho_1 \cdot h_2$$

МЕТОДИКА

Минимально необходимая энергия для прохождения такого слоя вещества:

$$E_p = f \cdot \eta = (11.4 \cdot 10 + 5) \cdot 2 = 239 \text{ МэВ (250 МэВ при учете использования дюралюминиевого корпуса),}$$

Таким образом, регистрируемая скорость счета мюонного телескопа 500 имп/мин соответствует потоку мюонов в нижней атмосфере 40 частиц /($\text{м}^2 \text{ с ср}$) с энергиями $E > 250 \text{ МэВ}$.

Верхняя пластина принимает поток со всей верхней полусферы. Однако, известно, что интенсивность мюонов изменяется как $\cos^2 \theta$, где θ - зенитный угол. Кроме того, эффективная площадь пластины прямо пропорциональна $\cos(\theta)$. Тогда эффективная диаграмма направленности будет выражаться через формулу:

$$\xi = \cos^3(\theta) \cdot \sin(\theta) d\theta$$

Интегрирование этого выражения от 0 до заданного предела зенитного угла Θ даст зависимость $\cos^4 \Theta$. Следовательно, вкладом углов более 45 градусов можно пренебречь, и рассматривать, что поток принимается из телесного угла, охваченного конусом при вершине 45 градусов. В стерадианах это будет $3/2$ стерадиана. Тогда, принимая за среднюю скорость счета верхней пластины $N = 3000$, получается:

$$p_1 = 3000 / (0,25 \cdot 1,5 \cdot 60) = 133 \text{ частицы / (м}^2 \text{ с ср)}$$

Пороговое значение энергии для регистрации верхней пластиной составляет $E = 5 \text{ МэВ}$ и определяется потерями в корпусе мюонного телескопа (крышка).

РЕЗУЛЬТАТ

В результате моделирования прохождения протонов ГКЛ через атмосферу Земли были получены высотные профили, представленные на рис. 2. Методикой пересчета скорости счета сцинтилляционных пластин в потоки излучения были получены точки, соответствующие на рис. 2. крестикам: \dagger_1 - поток мюонов, \dagger_2 - поток заряженных частиц. Как видно, данные хорошо совпадают, также следует заметить, что моделирование проводилось для «спокойного» времени, в присутствии только ГКЛ, что соответствует времени сделанных измерений на мюонном телескопе.

БЛАГОДАРНОСТИ. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-77-10018.

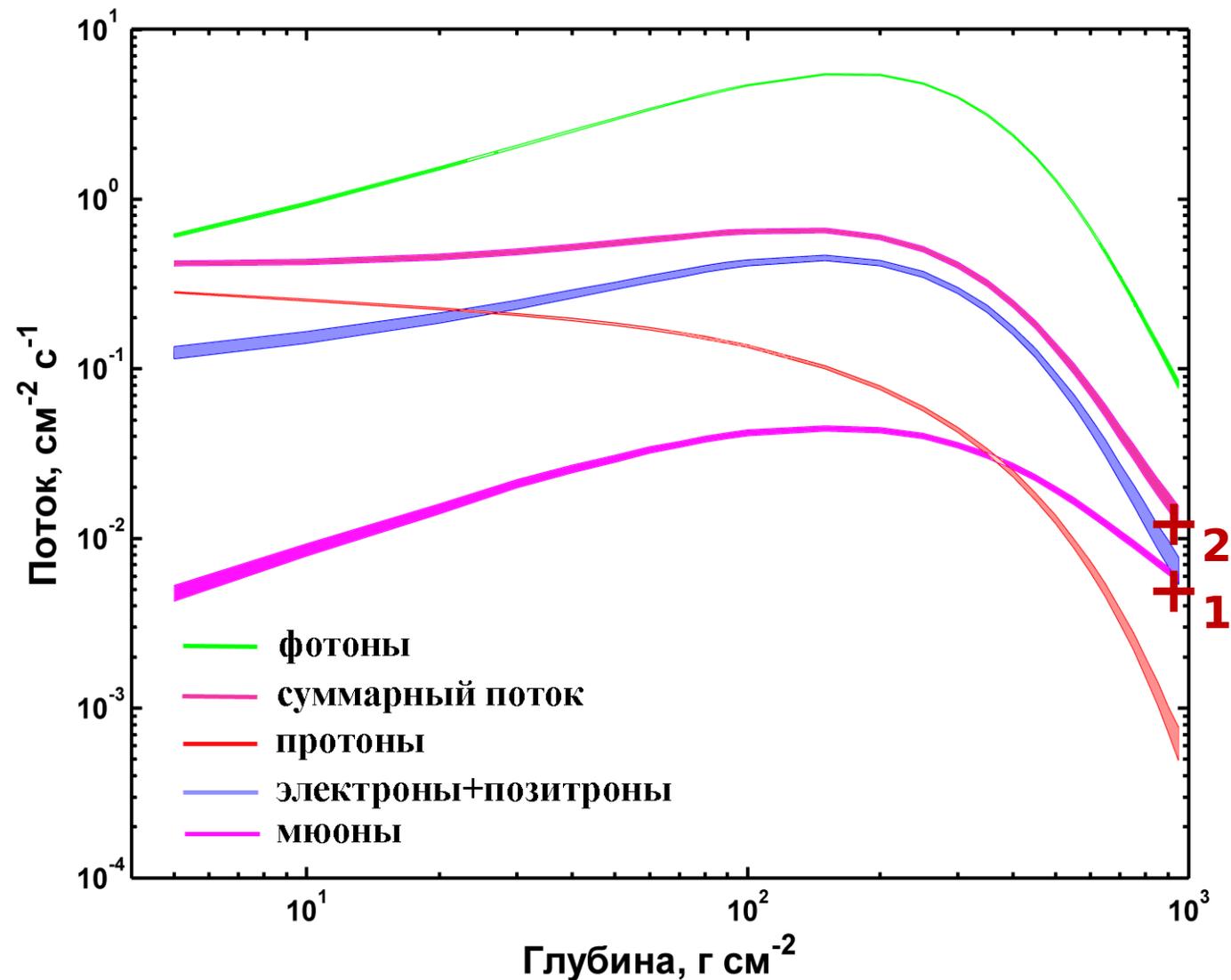


Рис. 2. Высотные профили потоков вторичных КЛ в атмосфере Земли, полученные путем моделирования, и соответствующие им значения экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурзин В. С. Астрофизика космических лучей: Учебное пособие для вузов // Университетская книга. М.: Логос. 2007. 488 с. ISBN 978-5-98704-171-6.
2. Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya, G.A., et al. // Adv. in Space Res. 2009. V. 44. I. 10. P. 1124-1137.
3. Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I.A. // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. D10302.
4. Velinov P. I.Y., Balabin Yu. V., Mauricev E. A. // Compt. rend. Acad. bulg. Sci. 2017. V. 70. I. 4. P. 545-555.
5. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Гвоздевский Б.Б. и др. // Известия РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 5. С. 711;
6. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2. № 4. С. 3-8; Mauricev E.A., Balabin Yu.V. // Solar-Terrestrial Physics. 2016. V. 2. I. 4. P. 3-10.
7. Agostinelli S., et al. // Nucl.Instrum. Methods Phys. Res. 2003. V. 506. Sect. A. P. 250.
8. Picone J. M. et al. // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. A. 12. P. 1468.