

# РАСЧЕТ ПРОХОЖДЕНИЯ СКЛ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ ДЛЯ СОБЫТИЯ GLE №69

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б.  
Полярный геофизический институт, [maurchev1987@gmail.com](mailto:maurchev1987@gmail.com)  
Skype: equene1

## **АБСТРАКТ**

Событиями GLE (Ground level enhancement) называется явление возрастания скорости счета нейтронных мониторов, возникающее вследствие увеличения числа протонов (в основном с энергией до 1 - 10 ГэВ) в потоке первичных космических лучей. Этому явлению, естественно, сопутствует увеличение скорости образования пар ионов на высотах от 0 до 80 км. Ранее в ПГИ была разработана методика, позволяющая получать энергетические спектры во время событий GLE методом решения обратной задачи с использованием данных сети станций нейтронных мониторов. Полученные спектры применяются нами как входные параметры при моделировании программным комплексом RUSCOSMICS прохождения частиц через атмосферу Земли, в ходе которого получают точные оценки скорости образования пар ионов, в частности в области высоких широт. В этой работе представлен такой результат, полученный для события, GLE №69, произошедшее 20.01.2005. Проводится анализ полученных профилей ионизации, принимая во внимание особенности, обусловленные характеристиками спектра первичных частиц. Также показаны угловые распределения вторичных частиц (электронов, гамма-квантов, нейтронов) в каскаде относительно перпендикулярного направления полета первичного протона.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основными частицами, входящими в состав первичных солнечных космических лучей (СКЛ), являются протоны, их доля составляет до 90 %. Оставшаяся часть состоит из электронов и ядер с зарядовым числом  $Z \geq 2$ . Вторгаясь в вещество атмосферы Земли эти частицы испытывают серии взаимодействий (в основном, с ядрами азота и кислорода), теряя свою энергию как на электромагнитные потери, так и на

ядерные реакции, в ходе которых рождаются целые каскады вторичных частиц (электроны, протоны, нейтроны, каоны, мюоны, гамма-кванты)[1].

Современный подход к исследованию частиц вторичных КЛ в атмосфере Земли включает в себя как экспериментальные методы [2], так и численное моделирование, например [3,4]. В ПГИ был разработан специальный модуль RUSCOSMICS [5,6], позволяющий детально изучать характеристики каскадов КЛ и получать их в виде количественных значений энергетических спектров, высотных кривых, а также вклада в скорость ионообразования. В данной работе представлен результат для частного случая, когда в качестве входных значений модели используется спектр СКЛ, соответствующий событию GLE 69.

## **МЕТОДИКА**

Применяемый в работе модуль программного комплекса RUSCOSMICS для расчета прохождения частиц КЛ через атмосферу Земли разработан как самостоятельная модель, в основе которой лежат классы и методы пакета GEANT4 [7]. Такой подход позволяет использовать принцип наследования и реализовывать возможности создания геометрии, описания процессов взаимодействий, а также генерировать первичные частицы с заданными энергетическими характеристиками. Атмосфера Земли моделировалась в виде столба воздуха с распределением ее физических параметров по высоте (например, элементы в количестве 5 % от общей массы в каждом слое), значения получаются при помощи NRLMSISE-00 [8]. В совокупности с алгоритмами оптимизации это дает существенный вклад в уменьшение потребления расчетных мощностей и увеличения скорости вычислений до нескольких раз. В зависимости от заданной широты и долготы также вычисляется необходимое значение жесткости геомагнитного обреза с использованием модели IGRF [9], конкретно для представленной работы эти параметры составляют 65.57 N, 33.39 E и  $R_{cutoff} = 0.65$  GV.

Источник первичных частиц реализуется при помощи класса, в который встроен парсер для чтения файлов данных и обработчик для создания необходимой функции плотности вероятности, соответствующей энергетическому спектру

первичных КЛ. Высота расположения составляет 80 км, а вектор скорости потока направлен перпендикулярно верхней плоскости столба воздуха (рис. 1).

Моделирование взаимодействия частиц с веществом реализуется при помощи класса физических процессов (стандартный лист) QGSP\_BERT\_HP, который официально рекомендован разработчиками GEANT4 для решения задач астрофизики КЛ. Накопление и обработка информации о потоках вторичных КЛ производится методами детектирующих объемов, расположенных на заданных высотах. Также в них реализован код, позволяющий производить вывод результата в виде гистограмм.

## **ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

В представленной работе проведены расчеты для протонов КЛ, модулированных СКЛ во время события GLE 69. Основной характеристикой источника первичных частиц, реализованного в модели, является плотность вероятности распределения энергии, выводимая методом нормировки дифференциального спектра протонов первичных КЛ. Для случая, рассматриваемого в этой статье, используются данные, полученные при помощи уникальной методики, разработанной в ПГИ г. Апатиты [9]. Согласно теории, представленной в работе авторов, спектр протонов первичных СКЛ состоит из двух компонент, быстрой и медленной, для каждой из которых дается соответствующее выражение:  $J_{PC} = J_0 \cdot \exp(-E/E_0)$  и  $J_{DC} = J_1 \cdot E^{-\gamma}$ , где  $J_0$ ,  $E_0$ ,  $J_1$ ,  $\gamma$  – коэффициенты, отличающиеся в зависимости от номера события GLE. Соответствующие параметры приведены в таблице, результирующие спектры представлены на рис. 2.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ**

В результате моделирования прохождения протонов СКЛ через атмосферу Земли, их взаимодействия с окружающим веществом и последующего развития каскадов были получены соответствующие кривые скорости ионизации в зависимости от высоты для географических координат 65.57 N, 33.39 E и значения жесткости геомагнитного обрезания  $R_{cutoff} = 0.65$  GV.

Результирующий график для события GLE 69 представлен на рис. 3. Угловые распределения электронов, гамма-квантов и нейтронов относительно перпендикулярного направления движения первичного протона показаны на рис. 4 – рис. 6.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, при помощи дифференциальных энергетических спектров, представленных на рис. 2 и высотных профилей скорости ионизации, представленных на рис. 3, в этой работе показано что для РС, быстрой компоненты СКЛ, характерно почти пропорциональное увеличение числа образования пар ионов относительно ГКЛ, с лишь небольшим смещением максимума профиля по высоте (максимальное увеличение потока на высоте 10 – 15 км на два порядка). Для ДС ситуация другая, поскольку огромное количество не испытывающих ядерные взаимодействия первичных частиц с низкой энергией вызывает пропорционально большой рост ионизации со смещением максимума вверх (увеличение потока на четыре порядка со смещением максимума на высоту 20 – 25 км).

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

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. («Наука». Москва, 1975).
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; Mauricev E. A., Balabin Yu. V., Gvozdevskii B. B., et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. I. 5. P. 657-659.
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.
9. Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Gvozdevsky B.B. // Astrophysics and Space Sciences Transactions. 2011. V. 7. I. 4. P. 459-463.

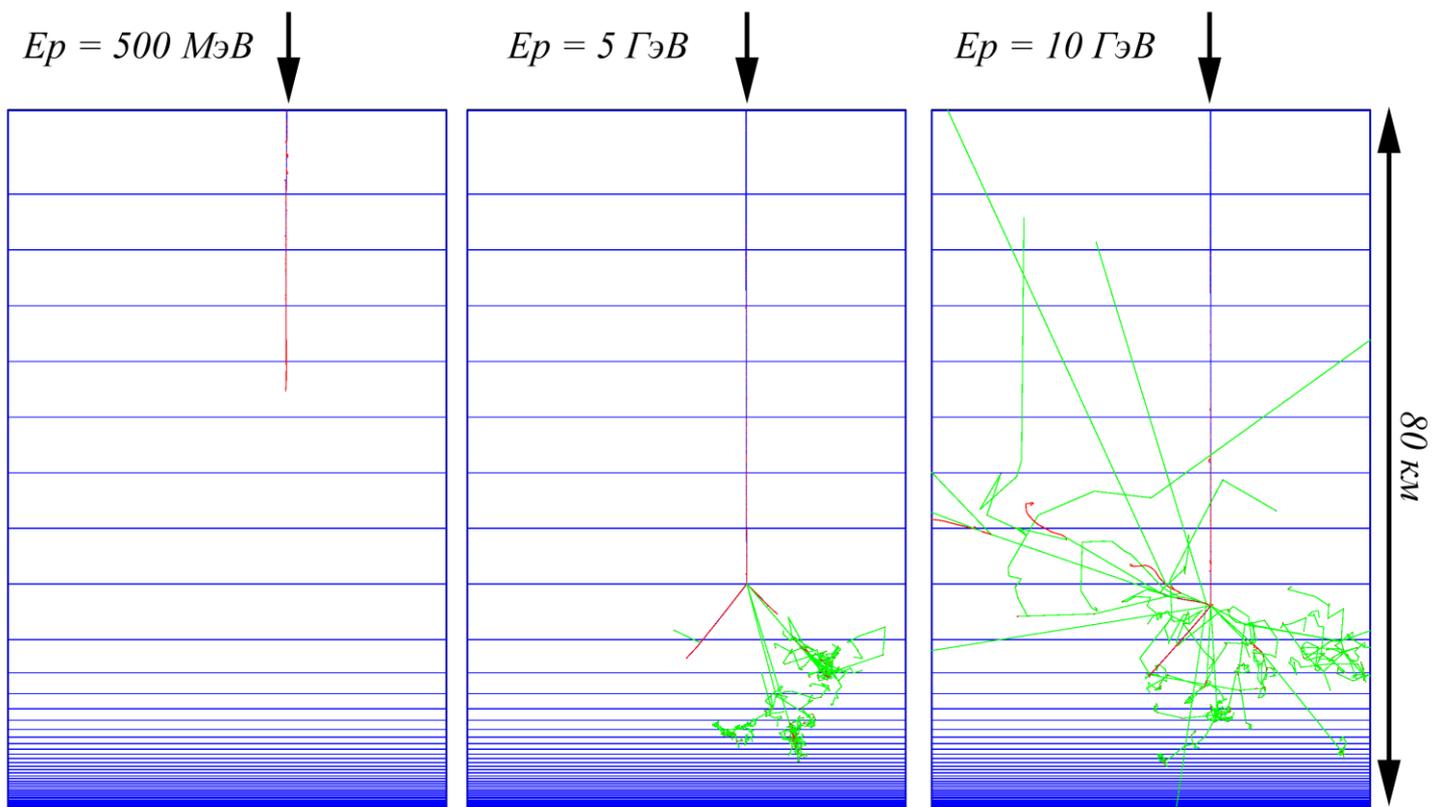


Рис. 1. Иллюстрация прохождения первичного протона с различными энергиями через столб воздуха. На трекинге синей линией показаны положительно заряженные частицы, красной - отрицательно, зеленой - нейтрально.

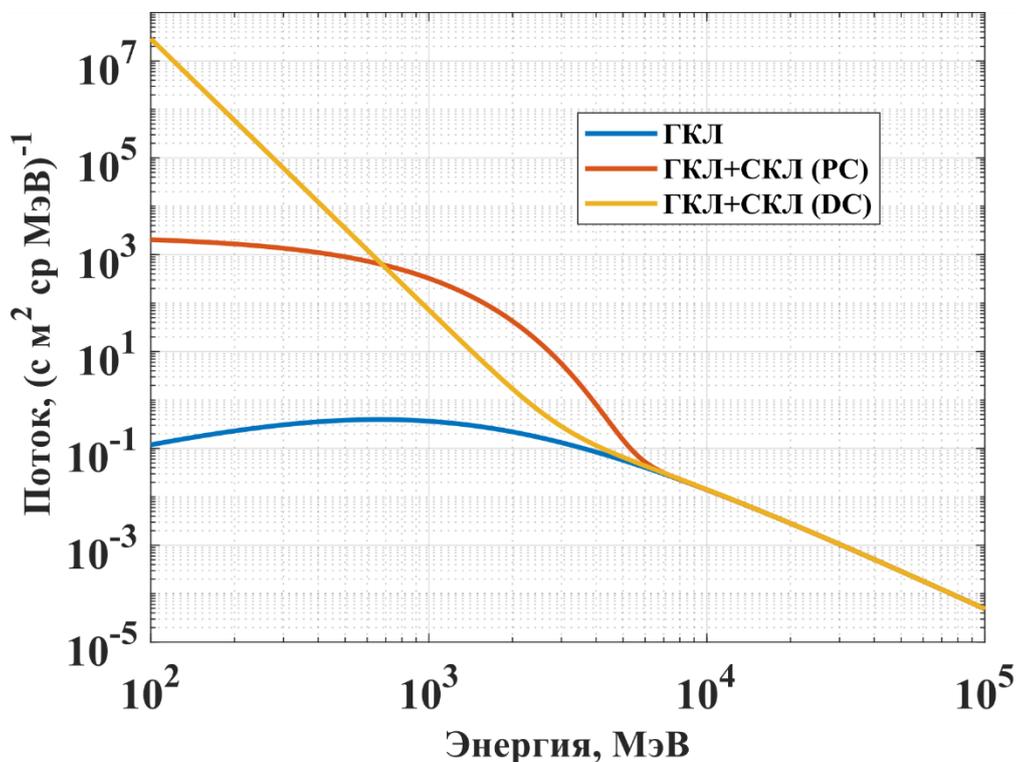


Рис. 2. Дифференциальные по энергии спектры протонов первичных КЛ, полученные по данным сети наземных станций НМ, используемые как входные параметры для расчета скорости ионообразования в атмосфере Земли во время события GLE 69.

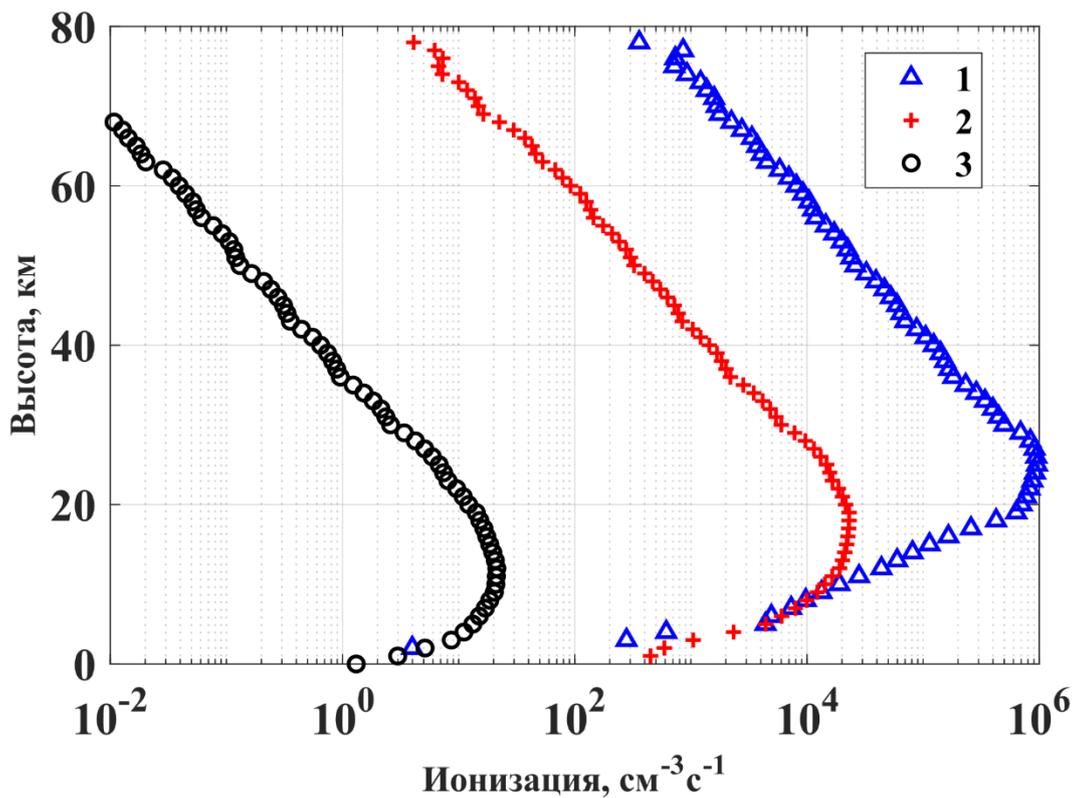


Рис. 3. Высотные профили скорости ионизации атмосферы Земли частицами КЛ во время события GLE 69 в случае моделирования прохождения через атмосферу Земли протонов с использованием спектра для медленной компоненты (1), быстрой компоненты (2) и ГКЛ (3).

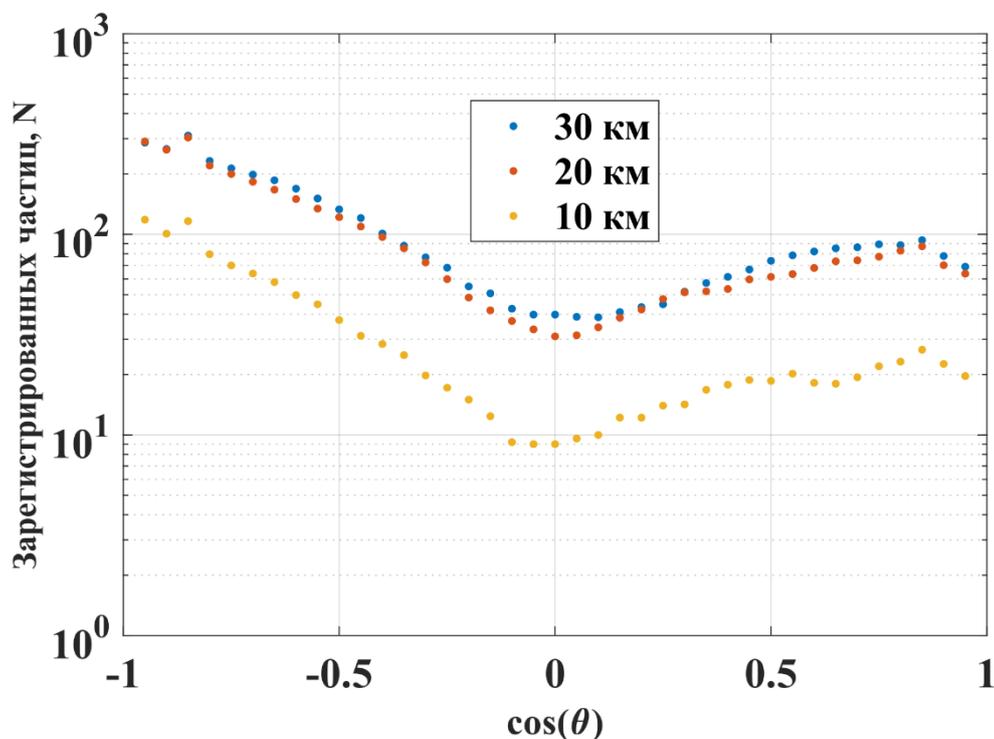


Рис. 4. Угловые распределения электронов на различных высотах в атмосфере Земли, полученные во время моделирования прохождения протонов с энергетическим спектром, соответствующим быстрой компоненте во время события GLE 69.

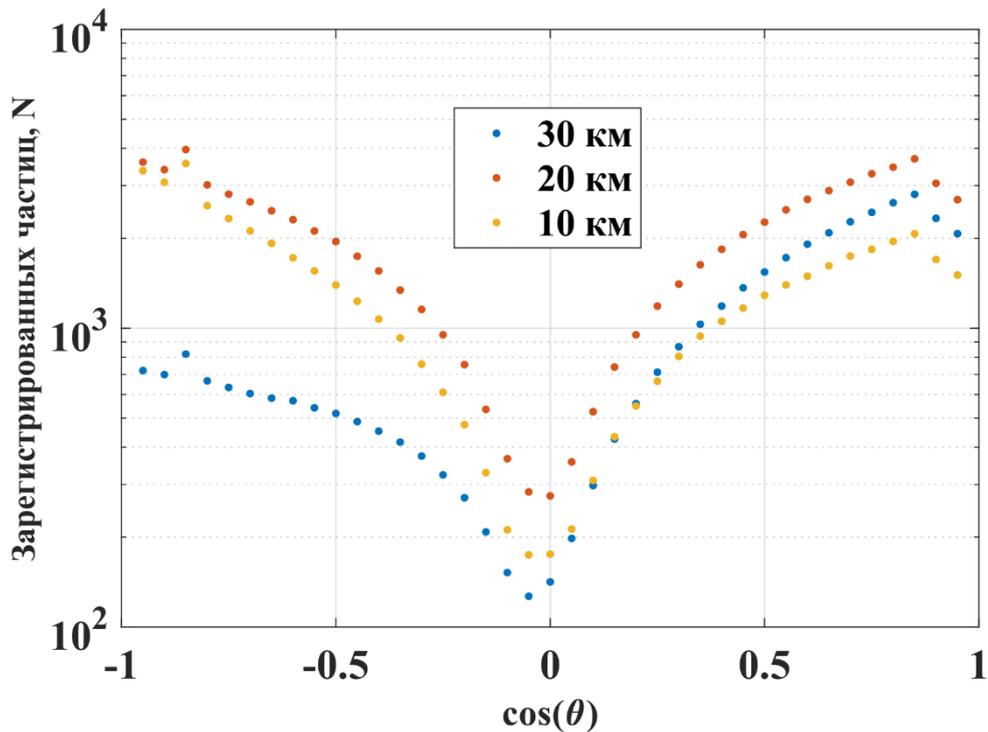


Рис. 5. Угловые распределения гамма-квантов на различных высотах в атмосфере Земли, полученные во время моделирования прохождения протонов с энергетическим спектром, соответствующим быстрой компоненте во время события GLE 69.

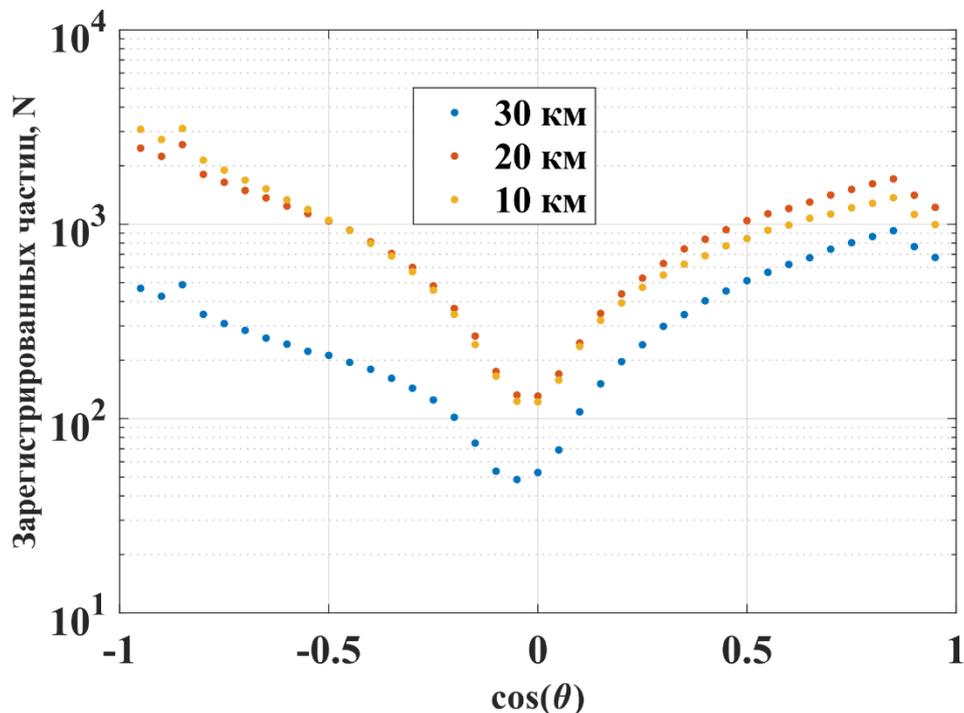


Рис. 6. Угловые распределения нейтронов на различных высотах в атмосфере Земли, полученные во время моделирования прохождения протонов с энергетическим спектром, соответствующим быстрой компоненте во время события GLE 69.