

УДК 537.591.15:550.34.09

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕТОДОМ МОНТЕ КАРЛО ЭКСПЕРИМЕНТА “ЛОРД” ПРИ УЧЕТЕ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ И ВЛИЯНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ШУМОВ

Г. А. Гусев, И. А. Кроль, В. А. Царев

*Приведены результаты моделирования методом Монте Карло эксперимента ЛОРД для двух типов антенных систем с различными параметрами. Учтено влияние возможного поляризационного рассогласования и эффектов, обусловленных “просачиванием” галактических шумов.*

В настоящее время радио метод регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий (КЛУВЭ и НУВЭ) довольно успешно развивается (см., например, обзор [1]). В частности, рассматривалась возможность использовать Луну как мишень для регистрации космических частиц радиометодом с помощью приемников, расположенных на лунной поверхности [2], с использованием наземных радиотелескопов [3] или радиоприемных устройств на окололунных спутниках [4–6]. Предварительный анализ, проведенный в рамках проекта “ЛОРД” (Лунный Орбитальный Радиоволновой Детектор) [4–6], показал высокий научный потенциал окололунного эксперимента. Более детальное рассмотрение эксперимента на основе метода Монте Карло было проведено в работах [7, 8]. В частности, в работе [8] были даны формулы, которые позволяют провести моделирование методом Монте Карло, с учетом реальной диаграммы направленности (ДН), поляризационного рассогласования и “просачивания” галактических шумов через ДН. Это позволяет проследить основные особенности отклика реального детектора на излучение Вавилова–Черенкова, без учета которых практически невозможно упростить решение многопараметрической обратной задачи восстановления энергии частицы. По результатам подобного моделирования может быть установлена иерархия параметров задачи и определена оптимальная стратегия ее решения.

В соответствии с соображениями, изложенными в [8], в настоящей работе мы провели численное моделирование для двух типов антенн. Для параболической антенны рассматриваются случаи с эффективными площадями  $15 \text{ м}^2$  и  $5 \text{ м}^2$ , то есть с более узкой и более широкой ДН. Для рупорной антенны также рассмотрено два коэффициента усиления 7 дБ и 14 дБ. Пороги регистрации для поля излучения выбирались на уровне  $5\sigma$ , где  $\sigma$  есть среднеквадратичное отклонение полного теплового шума системы, включающего температуру приемника  $T_{\text{mult}}$  и температуру антенны  $T_{\text{noise}}$  (с учетом ее ДН), которая, в свою очередь, включает температуру поверхности Луны и галактические шумы [9] (см. пункт 4 работы [8]). Для галактических шумов мы выбирали две величины: согласно формуле (6) работы [8] и с нормировочным коэффициентом в три раза меньшим, так как возможны значительные вариации галактического шума (см. обсуждение в [8]). Кроме того, для рупорной антенны для более полного учета галактического шума мы к температуре, определяемой “передним” лепестком ДН по формуле (3) работы [8], добавляли температуру, определяемую боковыми и задними лепестками через подавление температуры галактического шума на 15 дБ и 10 дБ. Для параболической антенны подобный учет становится излишним, так как для использованных нами параметров эффективных площадей эти лепестки имеют подавление около 20 и более дБ (то есть в этом случае их вклад можно не учитывать).

Что касается других параметров, то здесь мы ограничимся варьированием высоты  $h$  орбиты кругового вращения спутника и угла  $\theta_a$  между осью ДН параболической антенны и направлением на лимб Луны. Варьирование высоты затрагивает многие остальные параметры, определяющие величину электрического поля в точке приема. Параметр  $\theta_a$  особенно важен при узкой ДН. Например, при  $\theta_a = 0$  с высокой точностью можно считать, что температура антенны есть среднее между температурой Луны и температурой галактического шума. И, наоборот, при  $\theta_a > \delta$  (здесь  $\delta$  угловая ширина ДН) температура антенны практически полностью определяется температурой Луны. Кроме того, будет дана общая картина для всех событий, изображенных точками на плоскости  $E - W$ , где  $E$  – амплитуда электрического поля, зарегистрированного радиотелескопом и  $W$  – энергия каскада. Эта картина важна для решения обратной задачи определения энергии каскада по регистрируемым параметрам. С той же целью приведена также картина зависимости числа регистрируемых событий от угла  $\theta_s$ .

На рис. 1а приведена зависимость числа зарегистрированных событий в год от высоты спутника в случае параболической антенны с эффективной площадью  $15 \text{ м}^2$  для набора углов  $\theta_a$  от  $-6^\circ$  до  $9^\circ$  и для модели максимального галактического шума. Цифры

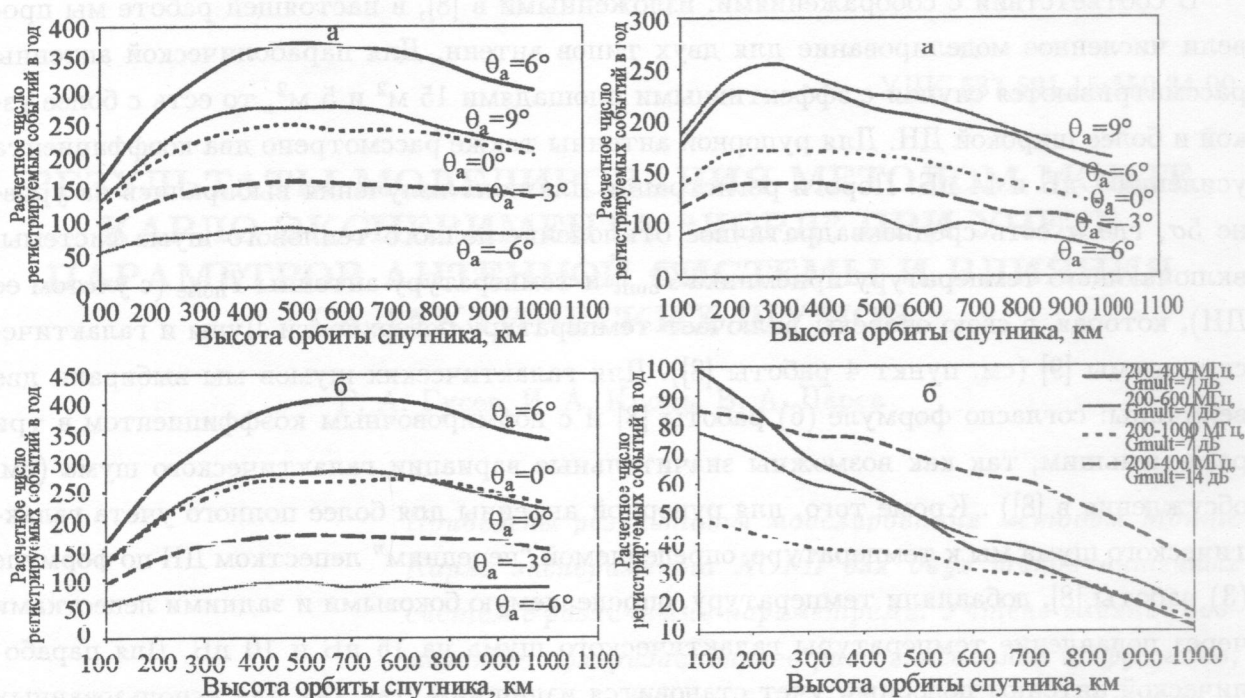


Рис. 1. а) Зависимость числа зарегистрированных событий в год от высоты спутника в случае параболической антенны с эффективной площадью  $15 \text{ м}^2$  для набора углов  $\theta_a$  от  $-6^\circ$  до  $9^\circ$  и для модели максимального галактического шума. б) Те же зависимости, что и на 1а), но для уменьшенного в три раза шума.

Рис. 2. а) Те же зависимости, что и на 1а), но для эффективной площади антенны  $S_{\text{эф}} = 5 \text{ м}^2$ . б) Те же зависимости, что и на 1а), но для рупорной антенны с вертикальной ориентацией.

на оси ординат означают полное число частиц, попавших на Луну, в рассматриваемом интервале энергий, для спектра с дифференциальным показателем  $\gamma = 2.75$  и с учетом геометрического фактора Луны. Из рис. 1а очевидно, что предпочтителен угол  $\theta_a = 6^\circ$  как с точки зрения эффективности регистрации, так и с точки зрения четкого указания для выбора оптимальной высоты орбиты спутника (в данном случае в диапазоне 400–700 км). Кроме того, сравнивая кривые для углов  $6^\circ$  и  $9^\circ$  градусов, можно сделать заключение о том, что “вариации” оси антенны вблизи угла  $6^\circ$  в пределах  $\pm 2^\circ$  могут приводить к заметному уменьшению эффективности регистрации. Сильное уменьшение эффективности при отрицательных углах  $\theta_a$  довольно очевидно из общих соображений, так как в этом случае часть главного лепестка направлена “мимо” Луны, что уменьшает площадь, с которой “собираются” события, и увеличивает вклад шума. Кроме того,

особенности излучения Вавилова–Черенкова и прохождения его через границу реголит-вакуум приводят к малым коэффициентам прохождения при больших зенитных углах по отношению к местной нормали в точке выхода луча.

Для выяснения роли галактических шумов на рис. 1б приведены аналогичные по остальным параметрам расчеты, но для уменьшенного в три раза шума. Можно сделать вывод, что в случае параболической антенны для такого набора параметров роль галактического шума невелика. Зависимость эффективности регистрации от эффективной площади параболической антенны сильнее, чем зависимость от шума. Этот вывод может быть сделан из анализа рис. 2а, на котором представлены те же зависимости, что и на рис. 1а, но для  $S_{\text{eff}} = 5 \text{ м}^2$ . Помимо общего уменьшения эффективности, их максимум сместился к меньшим высотам и несколько ослабла зависимость от угла  $\theta_a$ , как следствие увеличения ширины ДН.

На рис. 2б представлены аналогичные зависимости для рупорной антенны с вертикальной ориентацией и для модели галактического шума (6) работы [8]. Рассмотрены три диапазона частот с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 7$  и один низкочастотный с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 14$ . Отметим, что высотный ход эффективности регистрации резко изменился по сравнению со случаем параболической антенны, сменившись монотонным падением. Кроме того, максимальная эффективность на высоте 100 км уступает почти вдвое эффективности параболической антенны с площадью  $S_{\text{eff}} = 5 \text{ м}^2$  на той же высоте (см. рис. 2а). В случае большего коэффициента усиления  $G_{\text{mult}} = 14$  эффективность заметно возрастает, а скорость ее падения с высотой существенно уменьшается.

На рис. 3а дана общая картина событий на плоскости амплитуда электрического поля – энергия каскада для рупорной антенны с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 7$  для высоты 100 км в диапазоне частот 200–400 МГц. Такая картина полезна тем, что дает представление о том, как распределены зарегистрированные события при том или ином пороге, что существенно при решении обратной задачи определения энергии каскада. На рис. 3б приведена подобная картина для рупорной антенны с тем же коэффициентом усиления, той же полосой, но для высоты 300 км. Бросается в глаза уменьшение максимальной амплитуды электрического поля при больших энергиях каскада более чем в два раза, что является следствием увеличения расстояния до источника излучения.

На рис. 4а дана зависимость числа зарегистрированных событий от угла  $\theta_s$  для рупорной антенны с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 7$  для высот от 100 км до 400 км и для 600 км и 1000 км в полосе частот 200–600 МГц. Для грубых оценок энергии каска-

особенности излучения Вавилова–Черенкова и прохождения его через границу реголит-вакуум приводят к малым коэффициентам прохождения при больших зенитных углах по отношению к местной нормали в точке выхода луча.

Для выяснения роли галактических шумов на рис. 1б приведены аналогичные по остальным параметрам расчеты, но для уменьшенного в три раза шума. Можно сделать вывод, что в случае параболической антенны для такого набора параметров роль галактического шума невелика. Зависимость эффективности регистрации от эффективной площади параболической антенны сильнее, чем зависимость от шума. Этот вывод может быть сделан из анализа рис. 2а, на котором представлены те же зависимости, что и на рис. 1а, но для  $S_{\text{eff}} = 5 \text{ м}^2$ . Помимо общего уменьшения эффективности, их максимум сместился к меньшим высотам и несколько ослабла зависимость от угла  $\theta_a$ , как следствие увеличения ширины ДН.

На рис. 2б представлены аналогичные зависимости для рупорной антенны с вертикальной ориентацией и для модели галактического шума (6) работы [8]. Рассмотрены три диапазона частот с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 7$  и один низкочастотный с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 14$ . Отметим, что высотный ход эффективности регистрации резко изменился по сравнению со случаем параболической антенны, сменившись монотонным падением. Кроме того, максимальная эффективность на высоте 100 км уступает почти вдвое эффективности параболической антенны с площадью  $S_{\text{eff}} = 5 \text{ м}^2$  на той же высоте (см. рис. 2а). В случае большего коэффициента усиления  $G_{\text{mult}} = 14$  эффективность заметно возрастает, а скорость ее падения с высотой существенно уменьшается.

На рис. 3а дана общая картина событий на плоскости амплитуда электрического поля – энергия каскада для рупорной антенны с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 7$  для высоты 100 км в диапазоне частот 200–400 МГц. Такая картина полезна тем, что дает представление о том, как распределены зарегистрированные события при том или ином пороге, что существенно при решении обратной задачи определения энергии каскада. На рис. 3б приведена подобная картина для рупорной антенны с тем же коэффициентом усиления, той же полосой, но для высоты 300 км. Бросается в глаза уменьшение максимальной амплитуды электрического поля при больших энергиях каскада более чем в два раза, что является следствием увеличения расстояния до источника излучения.

На рис. 4а дана зависимость числа зарегистрированных событий от угла  $\theta_s$  для рупорной антенны с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 7$  для высот от 100 км до 400 км и для 600 км и 1000 км в полосе частот 200–600 МГц. Для грубых оценок энергии каска-

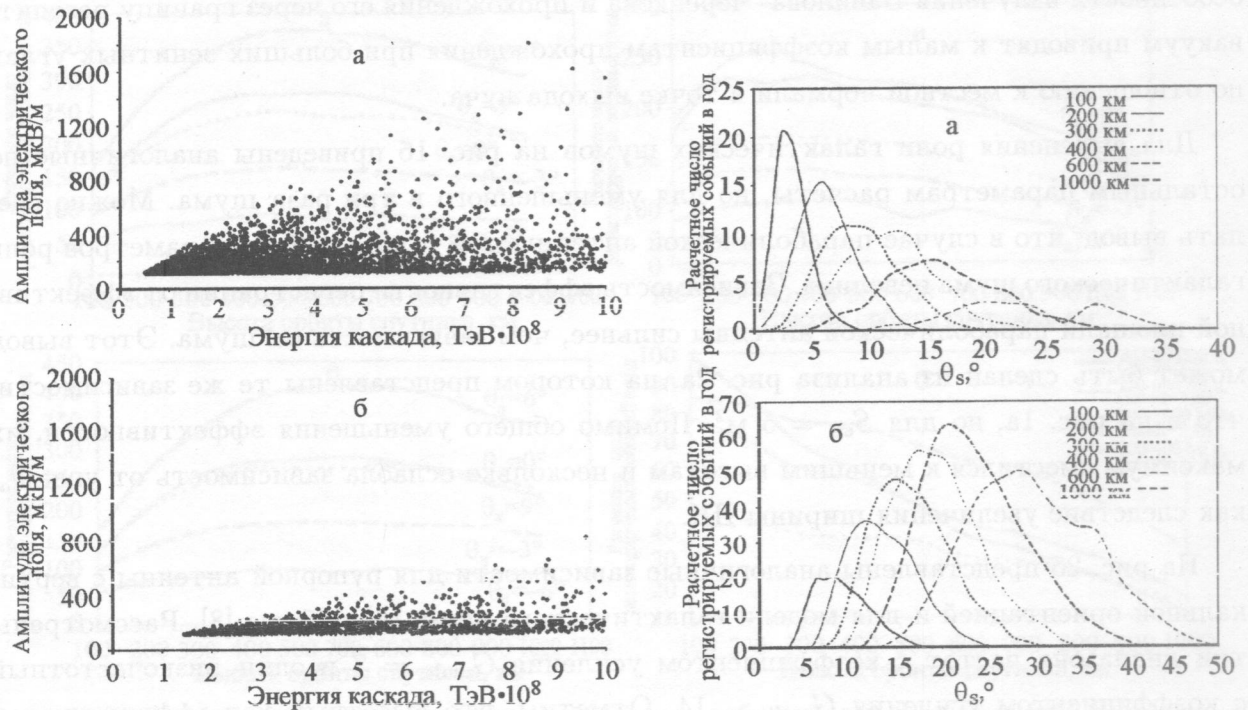


Рис. 3. а) Общая картина событий на плоскости амплитуда электрического поля – энергия каскада для рупорной антенны с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 7$  для высоты 100 км в диапазоне частот 200–400 МГц. б) То же, что и на 2а), но для высоты 300 км.

Рис. 4. а) Зависимость числа зарегистрированных событий от угла  $\theta_s$  для рупорной антенны с коэффициентом усиления  $G_{\text{mult}} = 7$  для высот от 100 км до 400 км и для 600 км и 1000 км в полосе частот 200–600 МГц. б) То же, что и на 4а), но для параболической антенны с эффективной площадью 15 м<sup>2</sup>.

да в случае параболической антенны можно приближенно считать, что угол  $\theta_s$  равен, согласно рис. 4а, углу, при котором достигается максимум числа событий, упростив решение обратной задачи на один параметр. Правда, такое упрощение работает тем хуже, чем больше высота орбиты, так как распределение по  $\theta_s$  становится более широким. Например, для высоты 300 км ширина по уровню 0.5 составляет около 9°, тогда как для высоты 100 км соответствующая величина около 3°. На рис. 4б аналогичная картина дана для параболической антенны с эффективной площадью 15 м<sup>2</sup> и с теми же параметрами шума, для тех же высот. В этом случае ширина распределений по  $\theta_s$  меняется значительно медленней, но сами распределения достаточно широки по сравнению

с таковыми для рупорных антенн. Так, для высоты 100 км угловая ширина оказывается около  $8^\circ$ , а на высоте 1000 км – около  $20^\circ$ . Такой результат может показаться парадоксальным, ибо ширина ДН параболической антенны намного меньше таковой для рупорной антенны. В результате для малых высот приближенное решение обратной задачи для рупорной антенны оказывается более простым, чем для параболической антенны.

Подчеркнем, что отделение событий с малыми амплитудами от остальных событий показывает, что большая их часть отвечает малым энергиям. Этот факт можно использовать для приближенного определения пороговой энергии регистрации при достаточной точности амплитудной калибровки радиотракта. Конечно, это возможно при условии, что число зарегистрированных событий достаточно велико, иначе распределение числа событий по энергии будет пологим и оценка будет грубой, кроме того флуктуации при этом столь велики, что само понятие распределения теряет смысл.

Данное моделирование показывает, как основные параметры радиотелескопа влияют, с одной стороны, на общий темп счета событий, а с другой – на распределения общего числа событий по различным параметрам. Это, в свою очередь, влияет на точность решения обратной задачи по определению энергии каскада. Ключевое значение здесь имеет антенна, так как она определяет очень важные для всего эксперимента параметры – достаточное для статистической точности полное число событий и амплитуду регистрируемых сигналов. От этих величин зависит ошибка в определении энергии каскада. Так, большая часть событий, отвечающих малым амплитудам электрического поля, страдает большой неточностью при решении обратной задачи, но имеет большую статистическую обеспеченность. Наоборот, события с большой амплитудой электрического поля доставляют лучшие возможности для решения обратной задачи, но имеют слабую статистическую обеспеченность.

Работа частично поддержана в рамках программы Президиума РАН “Нейтринная физика” и Роскосмоса НИР ТПС.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Tsarev V.A. J. Rad. Phys. Chem. **75**, 805 (2006).
- [2] Аскарьян Г.А. ЖЭТФ **48**, 988 (1965).
- [3] Дагкесаманский Р.Д., Железных И.М. Письма в ЖЭТФ **50**(5), 233 (1989).
- [4] Гусев Г.А., Ломоносов Б.Н., Пичхадзе К.М. и др. Космические Исследования **44**(1), 22 (2006).

- [5] V.A. Chechin, E.I. Feinberg, G.A. Gusev et al. Proc. of the Intern. ARENA Workshop, Zeuthen, 2005, ed. R. Nahuauer and S. Boser, (DESY, Zeuthen, Germany, 2005), p. 232.
- [6] Гусев Г.А., Ломоносов Б.Н., Ничхадзе К.М. и др. ДАН 406(3), 327 (2006).
- [7] Гусев Г.А., Ломоносов Б.Н., Полухина Н.Г. и др. Математическое моделирование (2007, в печати).
- [8] Гусев Г.А., Кроль И.А., Царев В.А. Краткие сообщения по физике ФИАН, No. 10, 3 (2007).
- [9] F.G. Stremmer, *Introduction to Communication Systems* (Addison-Wesley Publishing Company, 1991) 3rd ed.

Поступила в редакцию 25 апреля 2007 г.