

УДК 537. 591

ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ЛОРД И ВОЗМОЖНОСТЬ ДИАГНОСТИКИ РАДИАЦИОННОЙ ДЛИНЫ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Г. А. Гусев¹, З. Г. Гусева², Ч. Т. Маунг¹

Рассмотрена обратная задача реконструкции события в эксперименте ЛОРД с учётом неопределённой информации о величине радиационной длины лунного реголита по поверхности Луны. Показано, что решение обратной задачи позволяет для значительного числа регистрируемых индивидуальных событий осуществить довольно точную диагностику радиационной длины в различных точках лунной поверхности.

Ключевые слова: Луна, космические лучи, каскад, радиационная длина, радио метод, обратная задача, диагностика, реголит.

Перспективы развития радио метода регистрации космических лучей и нейтрино ультравысоких энергий (КЛУВЭ и НУВЭ) были рассмотрены более десяти лет тому назад (см., напр., обзор [1]). Чуть ранее было предложено использовать Луну как гигантскую мишень, в которой каскад, производимый первичными частицами КЛУВЭ и НУВЭ, генерирует радиоизлучение, которое может регистрироваться с помощью орбитальных [2, 3] радиоволновых телескопов. В условиях лунного орбитального эксперимента вдали от Земли есть преимущество по сравнению, например, со случаем использования околоземных спутников (смотри, напр., [4, 5]), заключающееся в сильном подавлении индустриальных и природных наземных шумов.

В работе [6] была впервые решена обратная задача реконструкции события (определения всех параметров, характеризующих событие и определяющих амплитуду сигнала) в эксперименте ЛОРД с радиодетектором, принимающим широкополосные сигналы от каскадов в полосе частот 200–400 МГц. При этом все параметры среды фиксировались, в частности, радиационная длина лунного реголита принималась равной $l_{\text{rad}} = 13.5$ см. С другой стороны, хорошо известно, что химический состав реголита

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: gusevgag@mail.ru.

² ИЗМИРАН им. Н. В. Пушкова, 142190 Россия, Москва, г. Троицк, Калужское ш., 4.

различен в разных местах лунной поверхности. Хотя в настоящее время нет достаточной информации о возможных пределах изменения величины l_{rad} , рассмотрим вариант $8.5 \text{ см} < l_{\text{rad}} < 13.5 \text{ см}$. Используя формулы работы [6], выполним методом Монте Карло расчёты полных чисел регистрации событий за год в интервале энергий W протонов $10^{20} \text{ эВ} < W < 10^{21} \text{ эВ}$. Мы предполагаем, что поток J и дифференциальный энергетический спектр КЛУВЭ экстраполируется согласно эксперименту AUGER [7] в виде $J \sim W^{-4.2}$.

Мы обладаем весьма неполной информацией о среде. Так, для образцов реголита, доставленного космическими станциями “Луна-16” и “Луна-20” [8] из “Моря Изобилия” радиационная длина в среднем составляет 12.79 см, а из горного массива между “Морем Изобилия” и “Морем Кризисов” радиационная длина значительно меньше – 10.45 см. Считая радиационную длину неопределённой, поставим вопрос, а нельзя ли в рамках решения обратной задачи рассмотреть возможность приближённой диагностики параметра l_{rad} .

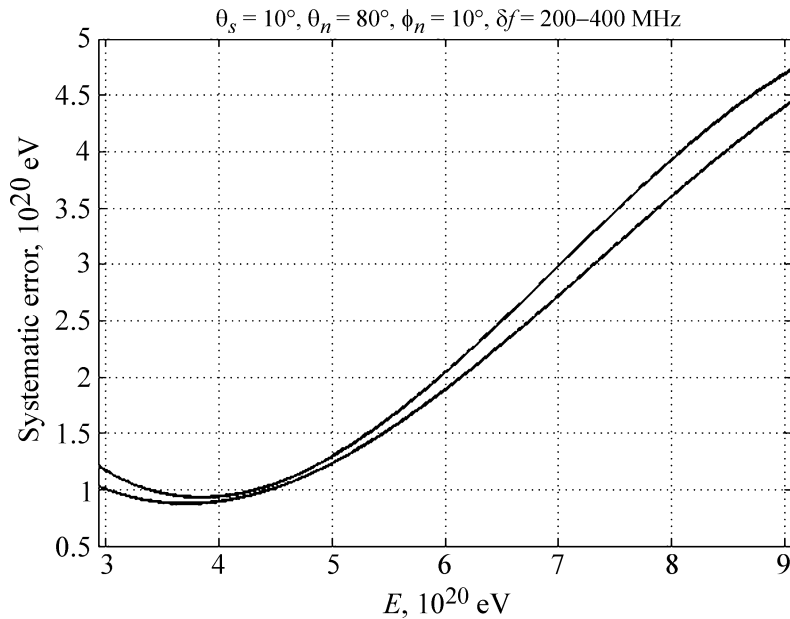


Рис. 1: Зависимости абсолютных систематических ошибок восстановления энергии событий от энергии частицы согласно калибровке для событий при заданных углах $\theta_s = 10^\circ$, $\theta_k = 80^\circ$, $\varphi_k = 10^\circ$ и радиационной длине $l_{\text{rad}} = 11$ см для обратной задачи с заданной радиационной длиной [6] (нижняя кривая) и для обратной задачи с диагностикой радиационной длины (верхняя кривая).

Таким образом, мы предлагаем рассмотреть обратную задачу для 5 неизвестных параметров: энергии частицы W , угла θ_s между спутниковой вертикалью и вертикалью в точке прихода частицы, зенитного угла прихода частицы θ_k , азимута прихода частицы относительно плоскости падения излучения φ_k и радиационной длины $l_{\text{рад}}$. Как и в работе [6], будем рассматривать регистрацию в широкой полосе частот 200–400 МГц для высоты орбиты лунного спутника 500 км. Поставим задачу реконструкции параметра $l_{\text{рад}}$, наряду с остальными параметрами, путём простого обобщения процедуры работы [6] на 5 измерений.

Теперь случайному розыгрышу подвергается также неизвестная величина $l_{\text{рад}}$. Для калибровки аналогично [6] выберем сначала события, соответствующие значению радиационной длины $l_{\text{рад}} = 11$ см, то есть в середине интервала 8.5–13.5 см. Что касается энергий и углов для калибровочных событий, то выберем их такими, чтобы можно было сравнить полученные результаты с результатами работы [6].

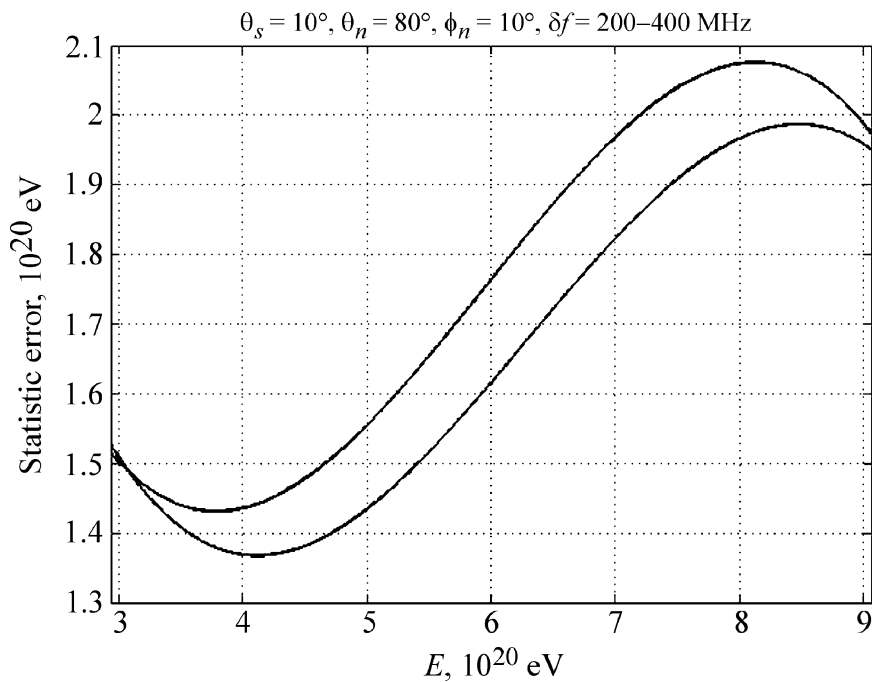


Рис. 2: Зависимости абсолютных статистических ошибок восстановления энергии событий от энергии частицы согласно калибровке для событий при заданных углах $\theta_s = 10^\circ$, $\theta_k = 80^\circ$, $\varphi_k = 10^\circ$ и радиационной длине $l_{\text{рад}} = 11$ см для обратной задачи с заданной радиационной длиной (нижняя кривая) и для обратной задачи с диагностикой радиационной длины (верхняя кривая).

Результаты решения этой новой обратной задачи, включающей приближённую диагностику среды, для систематических и статистических ошибок восстановления энергии частицы и радиационной длины l_{rad} представлены на рис. 1–4. На рис. 1, 2 даны соответственно систематические и статистические ошибки восстановления энергии частицы для калибровочных событий как функции энергии частицы.

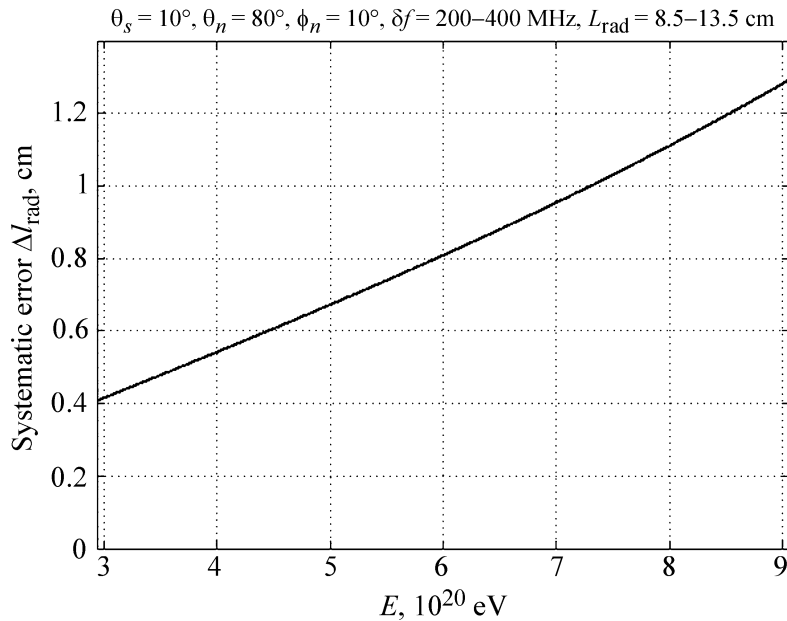


Рис. 3: Зависимости абсолютных систематических ошибок восстановления l_{rad} от энергии частицы согласно калибровке для событий при заданных углах $\theta_s = 10^\circ$, $\theta_k = 80^\circ$, $\varphi_k = 10^\circ$ и радиационной длине $l_{\text{rad}} = 11$ см.

Сравнение зависимостей на рис. 1 показывает, что систематические ошибки определения энергии частицы для задачи с диагностикой радиационной длины увеличиваются незначительно, то же можно сказать и о статистических ошибках.

На рис. 3, 4 даны соответственно абсолютные систематические и статистические ошибки решения, определяющего радиационную длину l_{rad} , как функции энергии частицы. Что же касается абсолютных ошибок определения радиационной длины l_{rad} , то они оказались для калибровочных событий с радиационной длиной в середине интервала небольшими. Если сравнивать абсолютные ошибки с величиной заданного полуинтервала $\Delta l_{\text{rad}} = 2.5$ см, то при энергии $W = 3 \cdot 10^{20}$ эВ систематическая ошибка 0.43 см и статистическая ошибка 0.6 см весьма малы. Знак систематической ошибки для таких событий не определён: вероятность положительных и отрицательных систематических ошибок распределена приблизительно поровну.

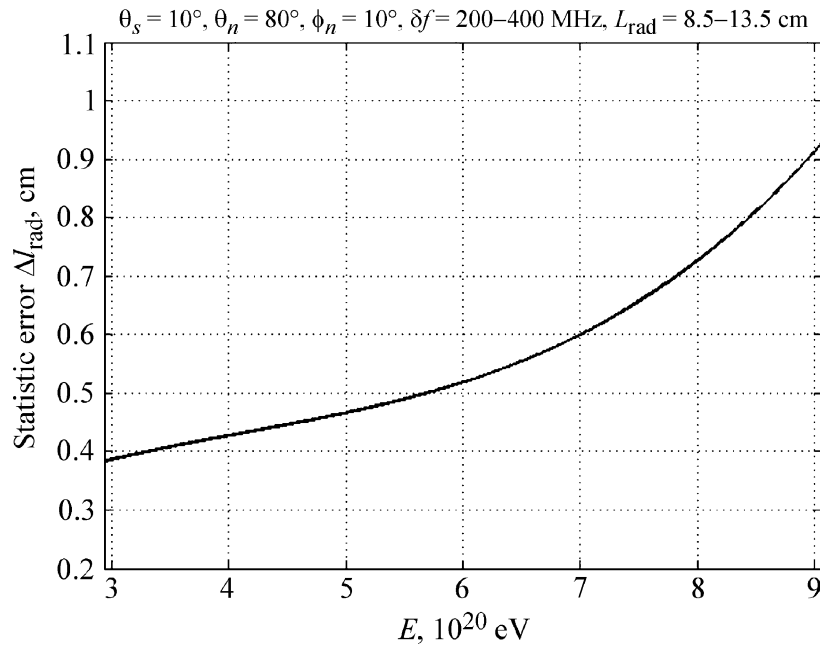


Рис. 4: Зависимости абсолютных статистических ошибок восстановления величины l_{rad} от энергии частицы согласно калибровке для событий при заданных углах $\theta_s = 10^\circ$, $\theta_k = 80^\circ$, $\varphi_k = 10^\circ$ и радиационной длине $l_{\text{rad}} = 11 \text{ см}$.

Так как до решения обратной задачи закладывался разброс значений радиационной длины $\Delta l_{\text{rad}} = 5 \text{ см}$, то полученный результат представляется весьма хорошим. Правда, следует учитывать, что этот результат получен за счёт небольшого ухудшения точности восстановления энергии частицы.

Посмотрим, как изменится результат для калибровочных событий, соответствующих радиационной длине на краях интервала её возможных значений. Для этого выполним калибровку при радиационных длинах $l_{\text{rad}} = 9 \text{ см}$ и $l_{\text{rad}} = 13 \text{ см}$. За неимением места мы не будем приводить аналогов рис. 1–4. Очень важно, что в этих случаях большие систематические ошибки оказываются одного знака (положительные для $l_{\text{rad}} = 9 \text{ см}$ и отрицательные для $l_{\text{rad}} = 13 \text{ см}$), так что они могут быть учтены.

Чтобы сделать вывод о возможности диагностики радиационной длины, необходимо сделать более точную калибровку в большом числе точек через 0.5 см и рассмотреть отдельно события с малой, средней и большой амплитудой сигнала. Кроме того, весь интервал радиационных длин поделим на три интервала: 1) $8.5\text{--}10.5 \text{ см}$, 2) $10.5\text{--}11.5 \text{ см}$ и 3) $11.5\text{--}13.5 \text{ см}$ и будем оценивать ошибки определения радиационной длины l_{rad} отдельно для каждого из интервалов 1)–3).

Следует учитывать, что для каждого индивидуального события в результате решения обратной задачи находится радиационная длина, сдвинутая (относительно реальной радиационной длины) на величину абсолютной систематической ошибки и попадающая в интервал, определяемый её флуктуациями. Следовательно, каждый из трёх определённых выше интервалов даст соответствующее изображение-интервал, в который попадает найденное решение для индивидуального события. Результаты детального рассмотрения показали, что все три интервала 1) 8.5–10.5 см, 2) 10.5–11.5 см и 3) 11.5–13.5 см алгоритмом решения обратной задачи переводятся во взаимно-пересекающиеся и более сжатые изображения-интервалы. Это сильно ограничивает возможности диагностики радиационной длины для индивидуального события по попаданию её в интервалы-изображения.

Ошибки определения радиационной длины минимальны для второго интервала. Для оценок вероятностей прогнозов диагностики радиационной длины для каждого индивидуального события будем предполагать, что распределения событий по интервалам радиационных длин равновероятное, так что в первом и третьем интервале оказываются по 40% событий, а во втором – 20%. Из-за частичного пересечения изображений-отрезков, отвечающих трём указанным выше интервалам, возможна либо однозначная диагностика, либо двузначная, либо трёхзначная (то есть диагностика невозможна).

Рассмотрим отдельно малые, средние и большие амплитуды сигнала. Малым амплитудам сигнала в соответствии с предполагаемым спектром КЛУВЭ, в 90% событий отвечают малые энергии частиц, и около 9% событий с малыми амплитудами составляет доля средних энергий, и есть ничтожная доля (около 1%) событий с большими энергиями. Для примера остановимся несколько подробнее на случае малых амплитуд.

Так, для малых амплитуд сигнала (в интервале 36–50 мкВ) с помощью калибровки получены следующие результаты. Первый интервал 8.5–10.5 см преобразуется в интервал изображений 10.01–10.99 см. Для событий из второго интервала 10.5–11.5 см получается интервал изображений 10.56–11.44 см. Для событий из третьего интервала 11.5–13.5 см получается интервал изображений 10.67–11.68 см. Анализ показывает, что при попадании изображения от индивидуального события в интервал 10.01–10.56 см мы однозначно диагностируем радиационную длину из первого интервала $l_{\text{rad}} = 9.5 \pm 0.7$ см, и вероятность такого прогноза составляет 22% от всех событий.

При попадании изображения от индивидуального события в интервал 11.44–11.68 см мы однозначно диагностируем радиационную длину из третьего интервала $l_{\text{rad}} = 12.5 \pm 0.6$ см, и вероятность такого прогноза составляет около 10% от всех событий.

При попадании изображения от индивидуального события в интервал 10.56–10.68 см мы диагностируем радиационную длину либо из первого, либо из второго интервала $l_{\text{rad}} = 10 \pm 0.7$ см, и вероятность такого прогноза составляет около 7% от всех событий. При попадании изображения от индивидуального события в интервал 10.99–11.44 см мы диагностируем радиационную длину либо из второго, либо из третьего интервала $l_{\text{rad}} = 12.0 \pm 0.6$ см, и вероятность такого прогноза составляет 28% от всех событий.

При попадании изображения от индивидуального события в интервал 10.68–10.99 см, что реализуется с вероятностью 33%, диагностика невозможна. Здесь и ниже для простоты даны средние в соответствующих интервалах (или средние по двум интервалам) радиационные длины, хотя индивидуальные события даже при однозначном решении могут давать малые отличия от них.

Для средних амплитуд сигнала (в интервале 50–80 мкВ) ситуация намного хуже. Опуская подробности, дадим окончательные результаты. Однозначно могут быть диагностированы события из первого интервала в 6% случаев от всех событий, для которых средняя радиационная длина равна $l_{\text{rad}} = 9.5 \pm 0.8$ см. Ещё 14% событий диагностируются из первого и второго интервалов со средней радиационной длиной $l_{\text{rad}} = 10 \pm 0.8$ см. Из оставшихся 80% событий для 24% диагностика невозможна, а для 56% от всех событий исключается попадание радиационной длины во второй интервал.

Для больших амплитуд сигнала (более 80 мкВ) также дадим только окончательные результаты. Однозначно могут быть диагностированы события со средними радиационными длинами из второго интервала в 13% случаев от всех событий, и средняя радиационная длина составляет $l_{\text{rad}} = 11 \pm 0.7$ см. Далее, 22% событий из первого интервала также диагностируются однозначно, и средняя радиационная длина составляет $l_{\text{rad}} = 9.5 \pm 0.9$ см, а остальные 65% от всех событий не могут быть диагностированы.

Таким образом, наилучшая диагностика l_{rad} реализуется для малых амплитуд сигнала, когда диагностика невозможна только для 26% событий, для больших амплитуд диагностика невозможна для 65% событий, для средних амплитуд диагностика невозможна для 80% событий. Отметим, что для малых амплитуд сигнала, которые составляют большую часть всех регистрируемых событий, интервал неопределённости при диагностике радиационной длины мал. Так, для статистической ошибки (среднее квадратическое отклонение σ) $\sigma = 0.7$ см получаем интервал неопределённости $2\sigma = 1.4$ см приблизительно в 3.6 раза меньше исходного интервала 5 см. Для максимальной ошибки $\sigma = 0.9$ см реализуется уменьшение неопределённости в 2.8 раза, что также неплохо.

В заключение отметим, что, несмотря на относительно ограниченный объём информации, получаемый в простейшем эксперименте ЛОРД, решение обратной задачи с целью диагностики радиационной длины в ограниченном числе точек лунной поверхности позволяет для значительной доли регистрируемых индивидуальных событий осуществить диагностику лунного приповерхностного слоя. Отметим, что такая задача диагностики радиационной длины до сих пор не ставилась.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] V. A. Tsarev, J. Rad. Phys. Chem. **75**, 805 (2006).
- [2] Г. А. Гусев, Б. Н. Ломоносов, К. М. Пичхадзе и др., Космические Исследования **44**(1), 22 (2006).
- [3] V. A. Chechin, E. L. Feinberg, G. A. Gusev, et al., *Proc. of the Intern. ARENA Workshop, DESY, Zeuthen, Germany, 2005*, ed. R. Nahnhauser and S. Boser, (DESY, Zeuthen, 2005), p. 232.
- [4] N. G. Lehtinen, P. W. Gorham, A. R. Jacobson, et al., Phys. Rev. D **69**, 013008 (2004).
- [5] Y. Takahashi, et al., New J. Phys. **11**, 065009 (2009).
- [6] Г. А. Гусев, Ч. Т. Маунг, Краткие сообщения по физике ФИАН **42**(6), 37 (2015).
- [7] A. Letessier-Selvon, Braz. J. of Phys. **44**(5), 560 (2014).
- [8] С. В. Викторов, В. И. Чесноков, *Химия лунного грунта* (М., Знание, 1978), 64 с.

Поступила в редакцию 21 июня 2016 г.