

## ВКЛАД $\delta$ -ЭЛЕКТРОНОВ В ОТНОШЕНИЕ ПОТОКОВ ГЕОМАГНИТНО ЗАХВАЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2019 г. Ю. В. Михайлова<sup>1</sup>, \*, А. М. Гальпер<sup>1</sup>, В. В. Михайлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ”, Москва, Россия

\*E-mail: yvmikhaylova@mephi.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

Результаты эксперимента ПАМЕЛА показали заметные различия в потоках электронов и позитронов, захваченных в радиационном поясе. Во внутреннем радиационном поясе обнаружено уменьшение отношения потоков позитронов и электронов с уменьшением энергии, что не укладывается в рамки моделей, основанных на взаимодействии космического излучения с ядрами остаточной атмосферы. По расчетам траекторий захваченных частиц в магнитосфере Земли проведены оценки плотности остаточной атмосферы в области захвата на  $L \sim 1.15–1.25$  отдельно для электронов и позитронов. В настоящей работе показано, что процессы взаимодействия захваченных электронов и позитронов с атомами остаточной атмосферы с образованием  $\delta$ -электронов действительно вносят существенный вклад в формирование потоков этих частиц.

DOI: 10.1134/S0367676519050260

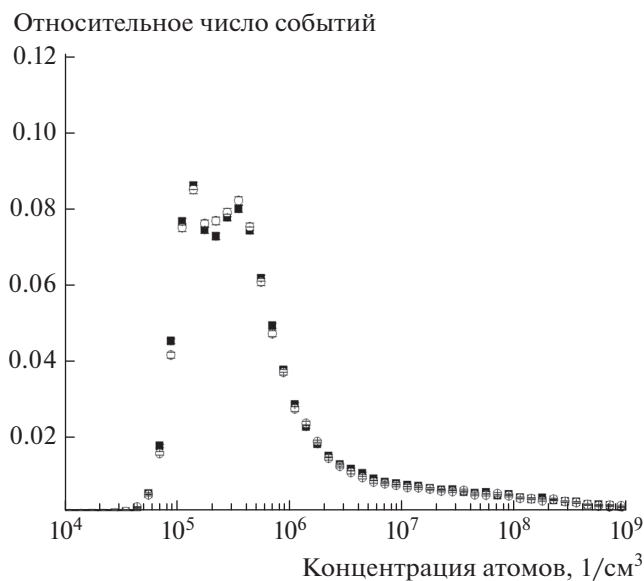
### ВВЕДЕНИЕ

Первые свидетельства о существовании суммарного потока электронов и позитронов высоких энергий  $E \geq 30$  МэВ во внутреннем радиационном поясе были получены в начале восьмидесятых годов прошлого века [1]. В экспериментах с магнитными спектрометрами “Мария”, “Мария-2” на орбитальных станциях САЛЮТ-7 и МИР впервые были проведены отдельные измерения дифференциальных энергетических спектров захваченных электронов и позитронов в диапазоне 15–150 МэВ. Отношение числа электронов и позитронов в суммарном потоке [2, 3] в районе Бразильской магнитной аномалии (БМА) показало, что поток электронов при энергиях в несколько десятков МэВ в несколько раз выше, чем поток позитронов. Захваченные электроны и позитроны с энергией более 150 МэВ были также зарегистрированы в эксперименте Гамма-1 [3] на  $L$ -оболочке  $\sim 1.2$ . Наконец, в эксперименте ПАМЕЛА на борту спутника “Ресурс ДК” с помощью магнитного спектрометра были проведены отдельные измерения захваченных электронов и позитронов с энергией более 100 МэВ (координаты  $L \approx 1.15–1.3$ ,  $B \approx 0.18–0.23$  Гс) с высокой статистической обеспеченностью [4]. При этом было показано изме-

нение с энергией отношения потоков захваченных позитронов к электронам.

Известно, что при взаимодействии космических лучей (протонов и ядер) с веществом верхних слоев атмосферы образуется небольшой избыток позитронов. Вторичные электроны и позитроны с подходящими питч-углами могут быть захвачены в радиационный пояс Земли [5]. Отношение потоков генерируемых позитронов к электронам составляет величину  $F_{e^+/e^-} \approx 1.2$  при энергиях выше 100 МэВ [6].

Новые измерения потоков электронов и позитронов в эксперименте ПАМЕЛА [8] показали, что во внутреннем радиационном поясе на оболочках  $L \approx 1.15–1.25$  и при  $B < 0.21$  Гс измеренное отношение потоков позитронов и электронов  $F_{e^+/e^-}$  близко к единице и систематически ниже расчетных значений из работы [6] для интервала энергий от 0.2 до 1 ГэВ [8]. В работе [7] нами было высказано предположение, что избыток электронов в диапазоне энергий до нескольких сотен МэВ может быть связан с процессами рассеяния захваченных частиц на электронах остаточной атмосферы с последующим захватом высокоэнергичных  $\delta$ -электронов.



**Рис. 1.** Зависимость от плотности атомов остаточной атмосферы вдоль траекторий захваченных частиц на  $L = 1.15-1.18$  для электронов (квадраты) и позитронов (открытые кружки).

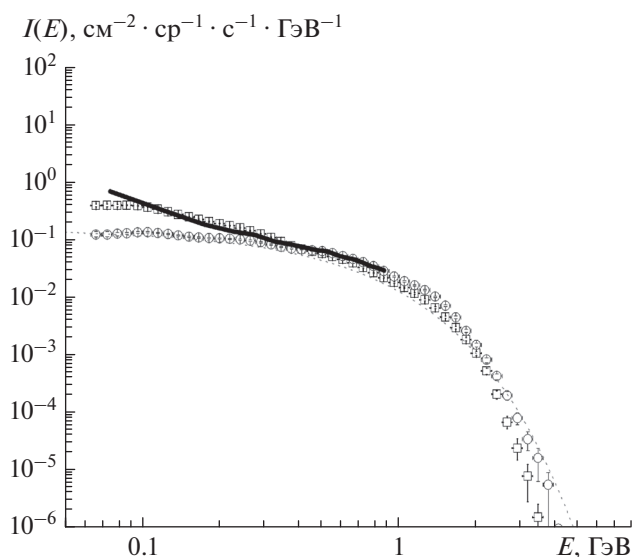
В настоящей работе на основе траекторных расчетов проведено моделирование процессов взаимодействия захваченных частиц с остаточной атмосферой и оценен возможный вклад  $\delta$ -электронов в измеряемое соотношение потоков электронов и позитронов.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ЗАХВАЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ И ПОЗИТРОНОВ

Для анализа особенностей формирования потоков захваченных электронов и позитронов в околосреднем космическом пространстве был проведен расчет траекторий частиц, регистрируемых в эксперименте ПАМЕЛА в области  $L \sim 1.2$ ,  $B \sim 0.2$  Гс в вертикальном направлении на высоте 350–600 км в области БМА. Магнитное поле Земли определялось по модели IGRF–2010 (Международное геомагнитное аналитическое поле, International Geomagnetic Reference Field, [www.ngdc.noaa.gov/IAAGA/vmod/igrf.html](http://www.ngdc.noaa.gov/IAAGA/vmod/igrf.html)). Плотность остаточной атмосферы на высотах выше 30 км определялась с использованием модели MSISE-90 (<https://ccmc.gsfc.nasa.gov>) для условий спокойного Солнца (индексы  $F10.7 = 150$ ,  $A_p = 4$ ). Расчет траекторий выполнен с использованием специальной программы на основе метода Рунге–Кутты четвертого порядка. При выполнении хотя бы одного оборота вокруг Земли частица считалась захваченной. Частицы прослеживались в течение 70 с, что для указанной области обеспечивает полный дрейф вокруг Земли при мини-

мальной энергии 50 МэВ. Для анализа было отобрано около 50000 траекторий захваченных частиц, совершивших полный дрейфовый оборот. Хотя плотность атмосферы на этих высотах исключительно мала  $\sim 10^{-17}$  г · см<sup>-3</sup>, именно она определяет время жизни захваченных частиц. При энергиях в интервале от  $\sim 100$  МэВ до  $\sim 1$  ГэВ основной вклад дают ионизационные и тормозные потери. Для релятивистских электронов и позитронов с энергией до сотен МэВ энергетические потери можно описать простым выражением [6]:  $dE/dx = 0.002 + 0.28 \cdot E$  [ГэВ · г<sup>-1</sup> · см<sup>-2</sup>]. При более низких энергиях потери частиц связаны с многократным рассеянием, а при более высоких — с потерями на синхротронное излучение. Сечения всех этих процессов практически одинаковы для релятивистских электронов и позитронов, за исключением рассеяния позитронов и электронов на электронах. Распределения по концентрации атомов вдоль траекторий захваченных электронов и позитронов показаны на рис. 1. Они практически идентичны, что позволяет утверждать, что время жизни электронов и позитронов, связанное с потерями энергии, одинаково, за исключением небольшого отличия, не превышающего нескольких процентов из-за процесса аннигиляции позитронов [7].

Таким образом, для объяснения отношения потоков позитронов и электронов при энергиях ниже  $E \sim 100$  МэВ необходим дополнительный источник электронов, так как процессы взаимодействия космического излучения и захваченных протонов с остаточной атмосферой предсказывают избыток позитронов [6]. В работе [7] было предположено, что таким источником может быть процесс образования быстрых  $\delta$ -электронов, образующихся при рассеянии высокоэнергетических захваченных позитронов и электронов на электронах в остаточной атмосфере на высотах 100–200 км в ионосфере и выше. Действительно, такой процесс ведет к уменьшению потока позитронов, которые передают свою энергию электронам. Дифференциальное сечение рассеяния позитрона на свободном электроне определяется формулой Баба [9]. Распределения по энергии вторичных электронов, образованных в процессе рассеяния позитронов на электронах и электронов на электронах различаются, так как в сечении рассеяния электрона с энергией  $E_0$  учитывается тождественность первичной и вторичной частиц, и энергия электрона отдачи не может превышать  $E_0/2$  для  $e^-e^-$  процесса [10]. Зная спектр захваченных позитронов [8], можно оценить спектр генерации  $P(E)$  вторичных электронов от данного источника. Для расчетов дифференциальный энергетический спектр позитронов на оболочке  $L = 1.18$  был аппроксимирован экспоненциальной функцией  $I(E) = 0.15 \exp(-E/0.14)$  [см<sup>-2</sup> · ср<sup>-1</sup> · ГэВ<sup>-1</sup>] в



**Рис. 2.** Дифференциальные энергетические спектры электронов (квадраты) и позитронов (открытые кружки) на оболочках  $L = 1.15-1.18$ . Сплошная линия показывает результат моделирования спектра электронов с учетом вклада  $\delta$ -электронов.

диапазоне от 100 МэВ до  $\sim 2$  ГэВ. Для данного спектра с использованием известных сечений [9, 10] и состава атмосферы было проведено моделирование  $10^6$  событий и определена функция  $P(E)$ . Если рождение частиц и их потери энергии связаны только с проходимой толщиной вещества, то энергетический спектр таких частиц  $J(E)$  может быть оценен по простой формуле  $J(E) = P(>E)/(dE/dx)$  [6], где  $P(>E)$  – интегральный спектр генерации. Расчет показывает, что в случае рассеяния позитрона на электроне с большой передачей энергии,  $\delta$ -электрон с энергией  $E > 100$  МэВ вылетает под малым углом, менее  $3^\circ$ , по отношению к направлению налетающего позитрона. В этом случае электрон практически сохраняетpitch-угол захваченного позитрона и с достаточно высокой вероятностью может быть захвачен в геомагнитной ловушке. На рис. 2 показаны экспериментальные спектры электронов и позитронов и результат моделирования. Для вероятности захвата был выбран коэффициент 0.2, обеспечивающий удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Из рис. 2 видно, что захват  $\delta$ -электронов дает существенный вклад в увеличение потока электронов при энергиях ниже

100 МэВ, и этот процесс необходимо учитывать при расчетах спектров электронов, захваченных в радиационном поясе Земли.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным процессом, приводящим к образованию высокоэнергичных захваченных электронов и позитронов с энергией выше нескольких сотен МэВ в радиационном поясе, является взаимодействие протонов космического излучения с остаточной атмосферой. Однако расчеты для этого процесса не могут воспроизвести наблюдаемое отношение потоков позитронов и электронов в радиационном поясе. В работе показано, что процесс рассеяния высокоэнергетических захваченных позитронов и электронов радиационного пояса Земли на остаточной атмосфере с образованием  $\delta$ -электронов дает существенный вклад в формирование потока электронов в диапазоне энергий от  $\sim 10$  до  $\sim 100$  МэВ.

Часть работы была выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России № 3.2131.2017/ПЧ и гранта РФФИ № 18-02-00656.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальпер А.М., Грачев В.М., Дмитренко В.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1983. Т. 38. С. 409.
2. Воронов С.А., Гальпер А.М., Кириллов-Узрюмов В.Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 43. С. 240.
3. Galper A.M., Dmitrenko V.V., Gratchev V.M. et al. Radiation Belts: Models and Standards Geophys. Monograph 97. 1997. P. 129.
4. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. // Phys. Rep. 2014. V. 544. P. 323.
5. Григоров Н.Л. Электроны высокой энергии в окрестности Земли. М.: Наука, 1985. 119 с.
6. Gusev A.A., Jayanthi U.B., Pankov V.M. et al. // Geofis. Int. 2004. V. 43. P. 241.
7. Михайлова Ю.В., Гальпер А.М., Михайлов В.В. // Ядерная физика. 2018. Т. 81. № 4. С. 493; Mikhailova Y.V., Galper A.M., Mikhailov V.V. // Phys. Atomic Nucl. 2018 V. 81. № 4. P. 520.
8. Михайлов В.В., Адриани О., Базилевская Г.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 2. С. 222; Mikhailov V.V., Adriani O., Bazilevskaya G.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. № 2. P. 203.
9. Берестецкий В.Б., Лишиц Е.М., Пятаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1989. 724 с.
10. Калиновский А.Н., Мохов Н.В., Никитин Ю.П. Прохождение частиц высоких энергий через вещество. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.