

УДК 524.1

## **$^2\text{H}$ - И $^3\text{He}$ -ИЗОТОПЫ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ ИЗ ДАННЫХ РАМЕЛА 2006–2014 гг.**

© 2019 г. Э. А. Богомолов<sup>1</sup>, \*, Г. И. Васильев<sup>1</sup>, В. Менн<sup>2</sup> от коллаборации РАМЕЛА

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университет Зиген, Зиген, Германия

\*E-mail: edward.bogomolov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 15.09.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 28.01.2019 г.

В работе впервые представлены результаты наблюдений в орбитальном эксперименте РАМЕЛА в 2006–2014 гг. изотопов  $^2\text{H}$  с энергией свыше  $\sim 50$  МэВ/нукл. и  $^3\text{He}$  с энергией свыше  $\sim 90$  МэВ/нукл. во время солнечных вспышек. Для селекции изотопов использован времяпролетный анализ ядер с известной из траекторных измерений жесткостью в сцинтилляционном телескопе магнитного спектрометра РАМЕЛА и данные об их ионизационных потерях в стриповых детекторах трекера. Проведено GEANT4 моделирование генерации ядер  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  в солнечном веществе спектрами ядер  $^1\text{H}$  и  $^4\text{He}$  СКЛ для оценки пространственных масштабов области генерации изотопов. Вероятно обнаружено дополнительное ускорение ядер  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  во время вспышек.

DOI: 10.1134/S0367676519050119

### ВВЕДЕНИЕ

Знание изотопного состава ядер, генерируемых во время солнечных вспышек, дает дополнительный канал информации о процессах на Солнце, но при естественном интересе к этой проблеме прогресс в этой области невелик. Первые наблюдения ядер  $^3\text{He}$  при энергиях порядка 1–10 МэВ/нуклон во время вспышек проведены на космических аппаратах США (HITS, ISEE-C) в 70-е [1], но данные об интенсивностях из-за трудностей интерпретации полетных данных не были представлены. Тогда же выполнены первые расчеты генерации ядер  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  и  $^3\text{He}$  в солнечном веществе при различных спектральных индексах СКЛ [2]. С конца 90-х некоторые данные о спектрах  $^3\text{He}$  во время вспышек были получены на приборах НИНА (МИФИ) [3] и потоках на CRIS (ACE). В космическом эксперименте РАМЕЛА в 2006–2015 гг. регистрировались спектры протонов и гелия СКЛ во время солнечных вспышек [4, 5], получены первые данные о спектрах солнечных нейтронов [6] и естественно было попробовать измерить изотопный состав СКЛ.

### МЕТОД АНАЛИЗА

Селекция изотопов ядер H и He в международном космическом эксперименте РАМЕЛА осуществляется с использованием данных траектор-

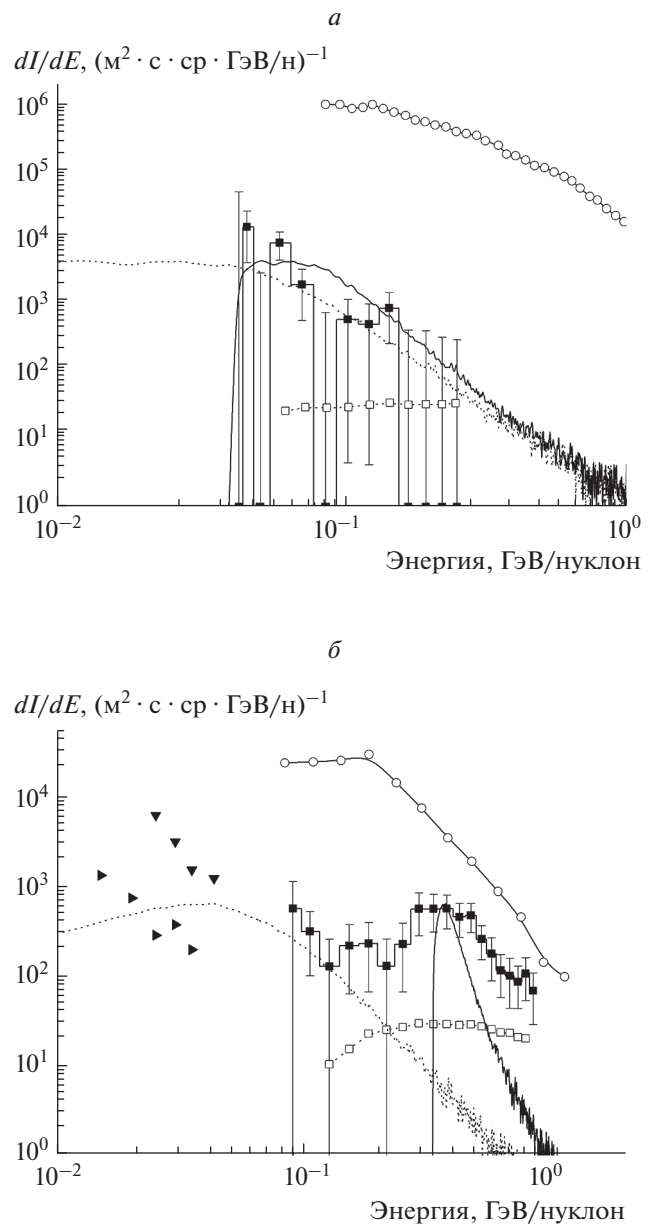
ных измерений в трекаре из стриповых детекторов в поле магнита прибора, дающих жесткость ядер, анализа времени пролета (TOF) ядер от их входа в прибор до выхода из магнита спектрометра и их ионизационных потерь в стриповых детекторах трекера. Нижние пределы регистрации и селекции изотопов по жесткости при TOF анализе (0.60 ГВ для  $^2\text{H}$ , 0.62 ГВ для  $^3\text{He}$  и 0.69 ГВ для  $^4\text{He}$ ) связаны с ионизационными потерями ядер в материале прибора до выхода из зазора магнита ( $\sim 5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ ) и временным разрешением прибора ( $\sim 0.25 \text{ нс}$  для H и  $\sim 0.1 \text{ нс}$  для He). Для селекции изотопов  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$  и  $^3\text{He}$  с шагом по жесткости 0.1 ГВ были использованы 2D-анализ распределений ионизационных потерь ядер в стриповых детекторах трекера в зависимости от времени пролета (точнее от  $1/\beta$  – отношения скорости света к скорости ядра) между сцинтилляционными детекторами и анализ распределений событий по  $1/\beta$  или массам. При анализе распределений  $1/\beta$  при поиске событий  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  их ожидаемое положение определялось с использованием экспериментальных распределений при анализе ГКЛ. Дополнительно часть обнаруженных ядер  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  в области жесткостей свыше  $\sim 1$  ГВ контролировалась по распределениям ионизационных потерь в калориметре. Для определения нижних пределов регистрации изотопов  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  и коррекции измеренных прибором в зависимости

от жесткости отношений  $^2\text{H}/^1\text{H}$  и  $^3\text{He}/^4\text{He}$  к космическому пространству было проведено необходимое GEANT4 моделирование.

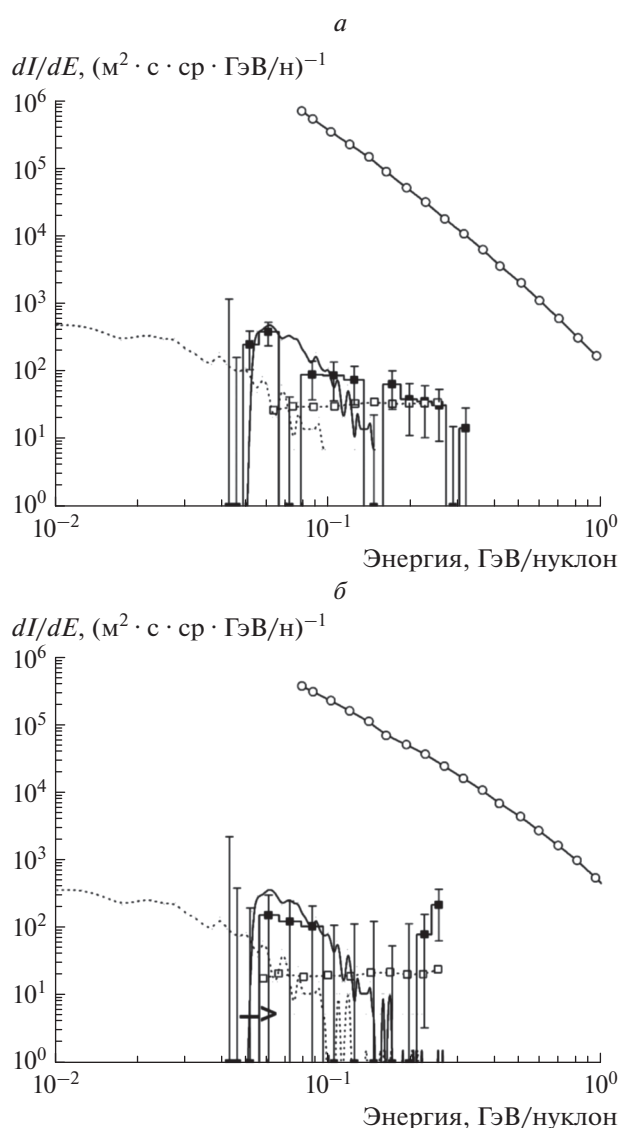
В ходе работы выяснилось, что в использованной для моделирования программе RamVMC в связи с анализом данных калориметра был установлен нижний предел для жесткостей ядер 1 ГВ на входе в PAMELA, который ограничивал снизу энергетический диапазон анализа изотопов H–He [5] и давал искаженные результаты до  $\sim 2$  ГВ для  $1/\text{beta}$  распределений при моделировании в области малых жесткостей, необходимых для анализа данных TOF. Для устранения проблемы в ФТИ было выполнено необходимое собственное GEANT4 моделирование.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Вначале поиск ядер  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  был проведен для солнечных вспышек 13 и 14 декабря 2006 г. Особенностью вспышки 13.12.2006, X 3.4, S05W23, 02:40 UT была относительно короткая генерация протонов и гелия СКЛ, и поиск ограничивался временным интервалом 03:09–03:37 UT на приполярном участке орбиты PAMELA. В результате анализа полетных данных было обнаружено  $\sim 14$  ядер  $^2\text{H}$ ,  $\sim 69$  ядер  $^3\text{He}$  и 2 ядра  $^3\text{H}$ . С использованием измеренных отношений  $^2\text{H}/^1\text{H}$  и  $^3\text{He}/^4\text{He}$  в зависимости от жесткости, откорректированных к входу в PAMELA, и спектров протонов и гелия СКЛ в вспышке 13.12.2006 [4] оценены жесткостные спектры, которые были преобразованы в энергетические спектры  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$ . Зарегистрированный спектр ядер  $^2\text{H}$  в вспышке 13.12.2006 представлен на рис. 1а, а спектр ядер  $^3\text{He}$  на рис. 1б. Для оценки масштабов области генерации  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  на Солнце было проведено для начала простейшее GEANT4 моделирование генерации изотопов в слое реального солнечного вещества  $1\text{--}5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$  спектрами протонов и гелия СКЛ. Согласно моделированию, генерация изотопов  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{He}$  гелием СКЛ значительно эффективнее генерации протонами СКЛ. Из опыта моделирования выяснилось, что различные модели генерации дают значительный разброс по спектрам изотопов, и были выбраны модели с результатами, близкими [2]. На основании моделирования и полученного спектра  $^3\text{He}$  с учетом фона  $^3\text{He}$  от ГКЛ толщина области генерации оценивается в  $3.7 \pm 0.5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$  солнечного вещества, что в фотосфере соответствует разумным  $\sim 4$  тыс. км. Спектр  $^3\text{He}$  начинается с  $\sim 0.6$  ГВ ( $\sim 90$  МэВ/нуклон), более низкие энергии обрезаны торможением ядер веществом PAMELA до их выхода из магнита, и наблюдается сдвиг зарегистрированного спектра относительно модельного в среднем на  $\sim 330$  МэВ/нуклон, что может быть интерпретировано как дополнительное ускорение ядер  $^3\text{He}$  после их генерации.



**Рис. 1.** а – Спектры ядер  $^1\text{H}$  и  $^2\text{H}$  в вспышке 13.12.2006:  $\circ$  –  $^1\text{H}$  СКЛ, PAMELA [4]  $\blacksquare$  –  $^2\text{H}$ , PAMELA, TOF,  $\square$  –  $^2\text{H}$  ГКЛ, PAMELA-2006; расчеты, генерация ядер  $^2\text{H}$  протонами и гелием СКЛ в вспышке 13.12.2006 в слое солнечного вещества толщиной  $5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ : пунктир – без дополнительного ускорения, линия – ускорение ядер  $^2\text{H}$ , 40 МэВ/нуклон; б – спектры ядер  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$  в вспышке 13.12.2006:  $\circ$  –  $^4\text{He}$  СКЛ, PAMELA [4]  $\blacksquare$  –  $^3\text{He}$ , PAMELA, TOF,  $\square$  –  $^3\text{He}$  ГКЛ, PAMELA-2006,  $\blacktriangledown$  – 07.11.1998, M 2.4, N14W43,  $^3\text{He}$ , НИНА (МИФИ) [3],  $\blacktriangleright$  – 14.11.1998, C1.2, N28W90,  $^3\text{He}$ , НИНА (МИФИ) [3]; расчеты, генерация ядер  $^3\text{He}$  протонами и гелием СКЛ в вспышке 13.12.2006 в слое солнечного вещества толщиной  $1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ : пунктир – без дополнительного ускорения, линия – ускорение ядер  $^3\text{He}$ , 330 МэВ/нуклон.



**Рис. 2.** *a* – Спектры ядер  $^1\text{H}$  и  $^2\text{H}$  в вспышке 14.12.2006:  $\circ$  –  $^1\text{H}$  СКЛ, PAMELA [5]  $\blacksquare$  –  $^2\text{H}$ , PAMELA, TOF,  $\square$  –  $^2\text{H}$  ГКЛ, PAMELA-2006; расчеты, генерация ядер  $^2\text{H}$  протонами СКЛ в вспышке 14.12.2006 в слое солнечного вещества толщиной  $5 \text{ г/см}^2$ : пунктир – без дополнительного ускорения, линия – сдвиг спектра генерации ядер  $^2\text{H}$ ,  $50 \text{ МэВ/нуклон}$ ; *б* – спектры ядер  $^1\text{H}$  и  $^2\text{H}$  в вспышке 06.01.2014:  $\circ$  –  $^1\text{H}$  СКЛ, PAMELA [5]  $\blacksquare$  –  $^2\text{H}$ , PAMELA, TOF,  $\square$  –  $^2\text{H}$  ГКЛ, PAMELA-2014; расчеты, генерация ядер  $^2\text{H}$  протонами СКЛ в вспышке 06.01.2014 в слое солнечного вещества толщиной  $5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ : пунктир – без дополнительного ускорения, линия – сдвиг спектра генерации ядер  $^2\text{H}$ ,  $50 \text{ МэВ/нуклон}$ .

По данным регистрации ядер  $^2\text{H}$  в вспышке 13.12.2006 с учетом фона  $^2\text{H}$  от ГКЛ количество вещества в зоне генерации может быть оценено

как  $4.0 \pm 1.3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ , измеренный спектр  $^2\text{H}$  начинается с  $\sim 0.6 \text{ ГВ}$  ( $\sim 50 \text{ МэВ/нуклон}$ ) с обрезанием более низких энергий, и сдвиг зарегистрированного спектра  $^2\text{H}$  относительно модельного может быть в среднем  $\sim 40 \text{ МэВ/нуклон}$ . Ожидаемый фон ядер  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  ГКЛ по данным PAMELA более чем на порядок ниже эффекта.

Солнечная вспышка 14.12.2006, X1.5, S06W46 22:15 UT была чисто протонной, достаточно длительной, что дало возможность провести измерения с 23:00 UT до 03:22 UT 15.12.2006 в течение 122 мин при 5 пересечениях приполярных областей. В результате поиска было зарегистрировано 54 ядра  $^2\text{H}$ , отсутствие  $^3\text{He}$  и после получения данных о зависимости  $^2\text{H}/^1\text{H}$  от жесткости, коррекции этих данных к входу в PAMELA с использованием данных о спектре протонов СКЛ в области максимума вспышки 14.12.2006 [5], получения жесткостного спектра ядер  $^2\text{H}$  был получен энергетический спектр ядер  $^2\text{H}$ , представленный на рис. 2а. На основании полученного энергетического спектра  $^2\text{H}$  и данных моделирования генерации  $^2\text{H}$  в слое солнечного вещества оценено количество вещества в зоне генерации ядер  $^2\text{H}$  на Солнце на уровне  $2.8 \pm 0.9 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ . Сдвиг измеренного спектра ядер  $^2\text{H}$  относительно генерации в модели слоя может быть интерпретирован как свидетельство дополнительного ускорения ядер  $^2\text{H}$  после их генерации в среднем на  $\sim 50 \text{ МэВ/нуклон}$ .

В настоящее время проведен поиск ядер  $^2\text{H}$  в солнечных вспышках 27.01.2012, 07.03.2012, 17.05.2012 и 06.01.2014. Анализ вспышки 06.01.2014, C2.1, S15W89, 07:45 UT позволил зарегистрировать  $\sim 7$  ядер  $^2\text{H}$  на шести приполярных участках орбиты, оценить область генерации на уровне  $1.9 \pm 1.4 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$  и дополнительное ускорение ядер  $^2\text{H}$  на уровне  $\sim 50 \text{ МэВ/нуклон}$ . Измеренный спектр ядер  $^2\text{H}$  в вспышке 06.01.2014 представлен на рис. 2б. В вспышке 27.01.2012, X1.7, N27W71 ядра  $^2\text{H}$  не обнаружены, 07.03.2012, X1.3, N15E26 обнаружено 2 ядра  $^2\text{H}$ , 17.05.2012, M5.1, N07W88 – ядра  $^2\text{H}$  не обнаружены.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящей работе предварительные данные поиска изотопов  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  в эксперименте PAMELA в шести солнечных вспышках 2006–2014 гг. позволили впервые оценить спектры этих изотопов при энергиях свыше  $50$ – $90 \text{ МэВ/нуклон}$ , показали в соответствии с ожиданиями более высокую эффективность генерации этих изотопов в случае гелиевых вспышек. На основе модели генерации  $^2\text{H}$  и  $^3\text{He}$  и экспериментальных данных оценен характерный пространственный масштаб области генерации изото-

пов в фотосфере Солнца на уровне 2–4 тыс. км и вероятно обнаружено дополнительное ускорение ядер  $^2\text{H}$  (~50 МэВ/нуклон) и  $^3\text{He}$  (~300 МэВ/нуклон) после их генерации в солнечном веществе. Расчетные спектры для ядер  $^2\text{H}$  в целом лучше согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-02-00093.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anglin J.D., Dietrich W.F., Simpson J.A.* // *Astrophys. J. Lett.* 1973. V. 186. L. 41.
2. *Ramaty R., Kozlovsky B.* // *Astrophys. J.* 1974. V. 193. P. 729.
3. *Bakaldin A., Galper A., Koldashov S. et al.* // *Astrophys. J.* 2002. V. 577. P. 513.
4. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // *Astrophys. J.* 2011. V. 742. P. 102.
5. *Bruno A., Bazilevskaya G.A., Boezio M. et al.* // *Astrophys. J.* 2018. V. 862. № 2. P. 97.
6. *Богомолов Э.А., Адриани О., Базилевская Г.А. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 2. С. 156; *Bogomolov E.A., Adriani O., Bazilevskaya G.A. et al.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. № 2. P. 132.