

УДК 524.1

ИЗОТОПЫ Li и Be В ЭКСПЕРИМЕНТЕ PAMELA ИЗ ПОЛЕТНЫХ ДАННЫХ 2006–2014 гг.

© 2019 г. Э. А. Богомолов¹, *, Г. И. Васильев¹ от имени коллаборации PAMELA

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

*E-mail: Edward.Bogomolov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

В работе представлены результаты измерений изотопного состава ядер лития и бериллия в галактических космических лучах с энергией до ~ 1 ГэВ/нуклон, полученные с лучшей по сравнению с достигнутой ранее статистической и методической достоверностью в орбитальном эксперименте PAMELA в 2006–2014 гг. Получены спектры изотопов ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Be}$ в зависимости от жесткости и энергии и их соотношений. Проведено сравнение результатов измерений с существующими экспериментальными и расчетными данными. На основании полученных новых данных по изотопному составу ядер Li и Be впервые оценен вклад локальных источников легких ядер от недавних (\sim млн. лет) близких (~ 100 пс) взрывов сверхновых в интенсивность галактических космических лучей.

DOI: 10.1134/S0367676519080076

ВВЕДЕНИЕ

В международном космическом эксперименте PAMELA при наблюдении позитронов впервые при энергиях свыше нескольких ГэВ был надежно обнаружен избыток позитронов в космических лучах [1] вероятно локальной природы, связанный с генерацией пар электронов и позитронов в остатках недавних (\sim млн. лет) близких (\sim сотен пс) сверхновых. При энергии ~ 100 ГэВ эффект превышал ожидаемую интенсивность от позитронов галактических космических лучей в ~ 3 раза, а при ~ 300 ГэВ, согласно наблюдениям AMS-02 [2], возрастал до ~ 10 раз, т.е. вклад локальных источников при исследовании позитронов с энергией свыше десятков ГэВ являлся основным. Что касается возможного вклада локальных источников в ядерную компоненту, то при поиске удобно использовать данные наблюдений изотопного состава легких ядер в космических лучах, т.к. на короткой дистанции ~ 100 пс изотопы ${}^2\text{H}$ и ${}^3\text{He}$ практически не генерируются, ${}^7\text{Be}$ сохраняется, т.к. на коротком пути практически не встречает электронов для реакции К-захвата, ${}^{10}\text{Be}$ также распадается мало, а ${}^7\text{Li}$ не производится при распадах ${}^7\text{Be}$. Все эти эффекты можно попробовать обнаружить, используя изотопный анализ полетных данных PAMELA, собранных в 2006–2014 гг.

Экспериментальная ситуация с данными для изотопов ядер Li и Be до эксперимента PAMELA

была ограничена измерениями в космических экспериментах IMP-8, -7, Voyager, Ulysses, ACE в области энергий ~ 0.1 – 0.2 ГэВ/нуклон и при более высоких энергиях результатами AMS-01 и стратосферными данными ISOMAX98, California University, Berkley и New Hampshire University [3]. Собранные данные из-за статистических и методических неточностей позволяли делать только общие качественные выводы.

Орбитальные измерения с магнитным спектрометром PAMELA в 2006–2014 гг. позволили повысить статистическую и методическую точность измерений изотопного состава ядер Li и Be в практически неисследованной области энергий до ~ 1 ГэВ/нуклон. Дополнительным преимуществом новых измерений по сравнению со стратосферными экспериментами являлось отсутствие необходимости коррекции результатов измерений на вклад остаточной атмосферы.

МЕТОД АНАЛИЗА

Селекция изотопов ядер Li и Be в диапазоне жесткостей ~ 1 – 5 ГВ в международном космическом эксперименте PAMELA осуществляется с использованием данных траекторных 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 измерениями ионизационных потерь ядер в трекаре и в калори-

метре PAMELA [3]. В настоящей работе основное внимание уделяли прежде всего области низких энергий ядер и использовали данные TOF. Нижние пределы регистрации и селекции изотопов по жесткости при TOF-анализе 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 ($\sim 0.08 \text{ нс}$). Для дополнительной селекции незначительного вклада фоновых событий от ядерных взаимодействий был использован 2D-анализ распределений ионизационных потерь ядер в стриповых детекторах трека в зависимости от времени пролета (точнее от $1/\beta$ – отношения скорости света к скорости ядра) между сцинтилляционными детекторами.

Для определения числа событий ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ или ${}^7\text{Be}$, ${}^9\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$ в выбранных с шагом 0.2 ГВ интервалах жесткостей проводилось сравнение экспериментальных распределений $1/\beta$ с результатами GEANT4-моделирования. Знание скоростей ядер ($1/\beta$) и их жесткостей позволяет также строить распределения событий по массам. При анализе для моделирования использовались ожидаемые из различных вариантов теории [4] соотношения изотопов при заданных жесткостях, проводилась нормировка данных моделирования на экспериментальное суммарное число событий. В области перекрытия распределений изотопов определялась граница величины $1/\beta$ (или ионизационных потерь при анализе данных калориметра), где из данных моделирования число событий анализируемых изотопов в области перекрытия распределений было одинаковым. Число ожидаемых событий в области перекрытия распределений $1/\beta$ дополнительно включалось в статистические ошибки полученных отношений изотопов. Полученные экспериментальные значения соотношений изотопов практически одинаковы для используемых различных теоретиче-

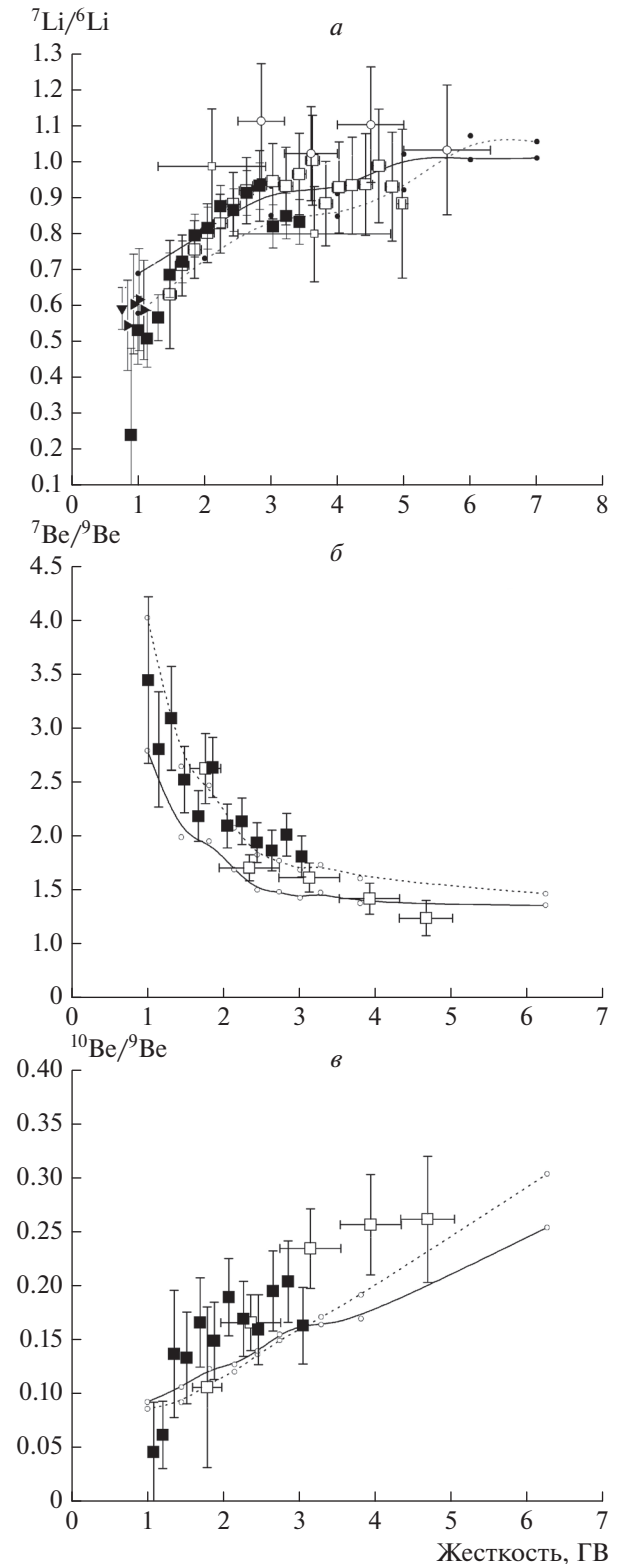
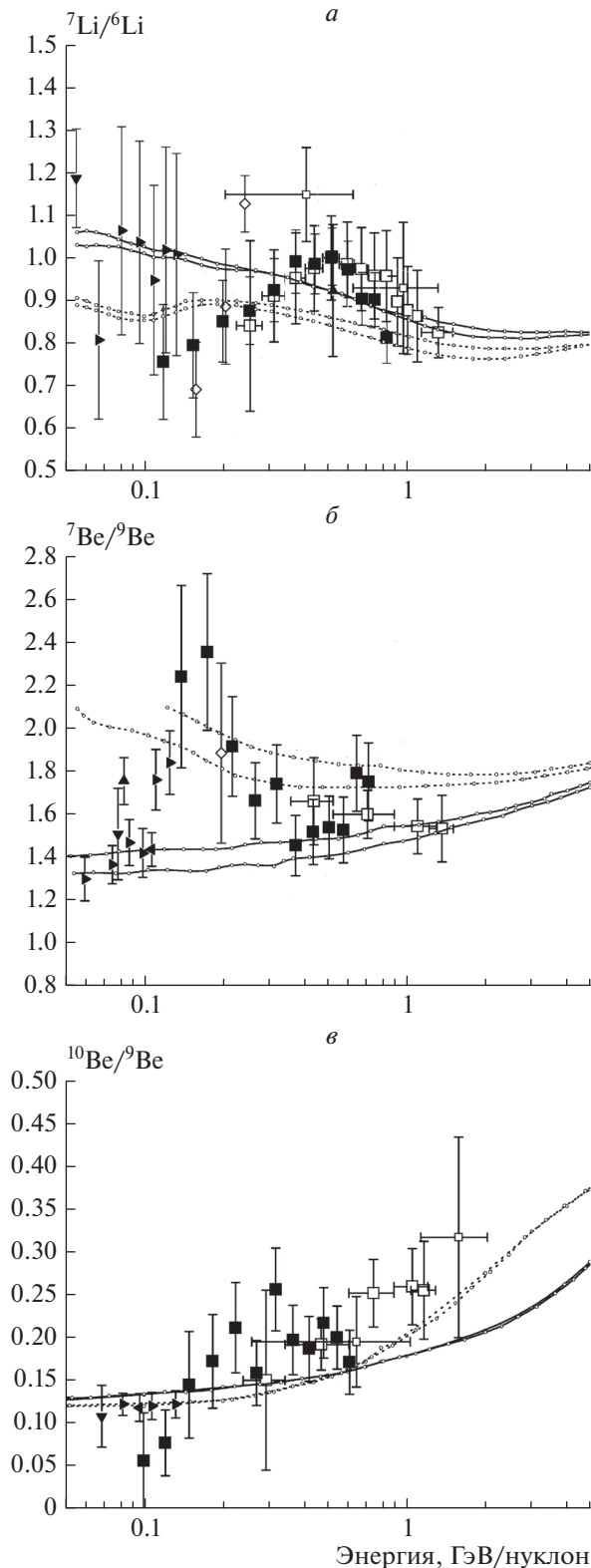


Рис. 1. *a* – отношения ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ в зависимости от жесткости ядер: ■ – PAMELA, TOF, □ – PAMELA, калориметр, ► – CRIS (ACE), ▼ – VOYAGER, ○ – AMS-01, 1998, 600 МВ, □ – ISOMAX98, 1998, баллон [3]; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [4], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [4]; *б* – отношения ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в зависимости от жесткости ядер: ■ – PAMELA, TOF, □ – PAMELA, калориметр; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [4], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [4]; *в* – отношения ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в зависимости от жесткости ядер: ■ – PAMELA, TOF, □ – PAMELA, калориметр; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [4], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [4].

ских моделей распространения ГКЛ в Галактике (GP – GALPROP) или генерации ядер в локальных источниках КЛ (LIS – Local Interstellar Sources).



пользование стандартного метода максимального правдоподобия дает близкие итоговые результаты по отношению изотопов ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be} + {}^{10}\text{Be}$, но пока не позволяет определить отношение ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ [5]. При анализе изотопов H и He при хорошей статистике событий без проблем флуктуаций оба метода давали практически одинаковые результаты.

В ходе работы выяснилось, что в использованной для моделирования программе PamVMC 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 Li и Be [5] и давал искаженные результаты до ~ 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

Отношения ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в настоящее время проанализированы по данным, полученным при полете прибора в 2006–2014 гг. В результате анализа полетных данных PAMELA получены отношения ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в зависимости от жесткости ядер. При переходе от приборных результатов к космическому пространству использованы данные моделирования. Отношения ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в ГКЛ в зависимости от жесткости ядер после получения жесткостных и энергетических спектров изотопов Li и Be преобразованы в отношения в зависимости от энергии изотопов и в сравнении с расчетами [4, 5] представлены на рис. 1, 2. Новые предварительные данные PAMELA по изотопам Li и Be дополняют результаты [3, 5] за счет увеличения

Рис. 2. *a* – Отношения ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ в зависимости от энергии ядер: ■ – PAMELA, TOF, □ – PAMELA, калориметр, ► – CRIS (ACE), ▼ – VOYAGER, ◇ – NH, баллон, ▲ – UC, Berkley, □ – ISOMAX98, 1998, баллон [3]; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [4], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [4]; *б* – отношения ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в зависимости от энергии ядер: ■ – PAMELA, TOF, □ – PAMELA, калориметр, ► – CRIS (ACE), ▲ – IMP-7,8, ▼ – VOYAGER, ◀ – ULYSSES, ◇ – NH, баллон [3]; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [4], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [4]; *в* – отношения ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в зависимости от энергии ядер: ■ – PAMELA, TOF, □ – PAMELA, калориметр, ► – CRIS (ACE), ▼ – VOYAGER, ◀ – ULYSSES, □ – ISOMAX98, 1998, баллон [3]; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [4], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [4].

Этот метод селекции изотопов использовался для получения предварительных данных о соотношения изотопов в зависимости от их жесткости. Ис-

статистики, расширяют энергетический диапазон измерений в область низких энергий за счет анализа данных TOF и впервые указывают (в соответствии с ожиданиями) на возможный вклад локальных источников от остатков недавних близких взрывов сверхновых в потоки галактических космических лучей. Прецизионные (~2%) данные PAMELA по отношениям ${}^2\text{H}/{}^1\text{H}$, ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ и ${}^2\text{H}/{}^4\text{He}$ [6] с учетом их солнечной модуляции [7] оказываются на ~20–30% меньше предсказаний GALPROP, что согласуется с предположением о генерации ядер ${}^1\text{H}$ и ${}^4\text{He}$ в близких источниках. Объем публикации не позволяет это проиллюстрировать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе предварительные данные анализа изотопного состава ядер лития и бериллия в космических лучах, полученные в эксперименте PAMELA при измерениях в 2006–2014 гг., вероятно позволяют впервые выделить вклад локальных источников изотопов Li и Be в ГКЛ. Данные PAMELA по изотопам ядер H и He также подтверждают это предположение. Эпоха “общей температуры по больнице” уходит в про-

шлое. Соавторами работы естественно являются члены коллаборации PAMELA [5], обеспечившие получение исходной полетной информации, использованной при настоящем анализе.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Nature. 2009. V. 458. № 7238. P. 607.
2. *Aguliar M., Alberti G., Alpat B. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. Art. № 141102.
3. *Богомолов Э.А., Васильев Г.И., Крутьков С.Ю. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 3. С. 334; *Bogomolov E.A., Vasilyev G.I., Krut'kov S.Yu. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79. № 3. P. 302.
4. *Moskalenko I.V., Strong A.W., Mashnik S.G. et al.* // arXiv: astro-ph/0306349. 2003.
5. *Menn W., Bogomolov E.A., Simon M. et al.* // Astrophys. J. 2018. V. 862. P. 141.
6. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // Astrophys. J. 2016. V. 818. № 1. P. 68.
7. *Богомолов Э.А., Васильев Г.И., Менн В.* // ЯФ. 2018. Т. 81. № 3. С. 377; *Bogomolov E.A., Vasilyev G.I., Menn W.* // Phys. Atom. Nucl. 2018. V. 81. № 3. P. 390.