

УДК 524.1

ИЗОТОПЫ ЛИТИЯ И БЕРИЛЛИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ РАМЕЛА

© 2023 г. Э. А. Богомолов^{1, *}, Г. И. Васильев¹, В. Менн², О. Адриани^{3, 4}, Г. А. Базилевская⁵, Дж. Барбарини^{6, 7}, Р. Белотти^{8, 9}, М. Боецио¹¹, В. Бонвичини¹¹, М. Бонджи^{3, 4}, С. Боттаи⁴, А. Бруно^{8, 9}, А. Вакки^{11, 12}, Е. Ваннуччини⁴, С. А. Воронов¹⁰, А. М. Гальпер¹⁰, К. Де Сантис^{13, 14}, В. Ди Феличе^{13, 15}, Дж. Зампа¹¹, Н. Зампа¹¹, М. Казолино¹³, Д. Кампана⁷, П. Карлсон¹⁶, Г. Кастеллини¹⁷, Ф. Кафанья⁹, А. А. Квашнин⁵, А. Н. Квашнин⁵, С. А. Колдобский¹⁰, И. А. Лагойда¹⁰, А. А. Леонов¹⁰, А. Г. Майоров¹⁰, В. В. Малахов¹⁰, М. Мартуччи^{14, 18}, Л. Марчелли¹⁴, М. Мерге^{13, 14}, В. В. Михайлов¹⁰, Е. Моккьютти¹¹, А. Монако^{8, 9}, Н. Мори⁴, Р. Мунини^{11, 19}, Дж. Остериа⁷, Б. Панико⁷, П. Папини⁴, П. Пикотца^{13, 14}, М. Риччи¹⁸, С. Риччиарини⁴, М. Симон², Р. Спарволи^{13, 14}, П. Спиллантини^{3, 4}, Ю. И. Стожков⁵, Ю. Т. Юркин¹⁰

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

“Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук”, Санкт-Петербург, Россия

²Университет Зиген, Зиген, Германия

³Университет Флоренции, факультет физики, Флоренция, Италия

⁴Национальный институт ядерной физики, Филиал во Флоренции, Флоренция, Италия

⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук”, Москва, Россия

⁶Неаполитанский университет имени Фридриха II, факультет физики, Неаполь, Италия

⁷Национальный институт ядерной физики, Филиал в Неаполе, Неаполь Италия

⁸Университет Бари, факультет физики, Бари, Италия

⁹Национальный институт ядерной физики, Филиал в Бари, Бари, Италия

¹⁰Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

“Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ””, Москва, Россия

¹¹Национальный институт ядерной физики, Филиал в Триесте, Триест, Италия

¹²Университет Удине, факультет математики и информатики, Триест, Италия

¹³Национальный институт ядерной физики, Филиал в Риме “Tor Vergata”, Рим, Италия

¹⁴Университет Рима “Tor Vergata”, факультет физики, Рим, Италия

¹⁵Итальянское космическое агентство, Центр научной информации, Рим, Италия

¹⁶Королевский технологический институт, факультет физики

и Центр физики космических частиц имени Оскара Кляйна, Стокгольм, Швеция

¹⁷Институт прикладной физики “Nello Carrara”, Флоренция, Италия

¹⁸Национальная лаборатория INFN в Фраскати, Рим, Италия; Фраскати, Италия

¹⁹Университет Триеста, Триест, Италия

*E-mail: Edward.Bogomolov@gmail.com

Поступила в редакцию 25.12.2022 г.

После доработки 12.02.2023 г.

Принята к публикации 29.03.2023 г.

Выполнен анализ изотопного состава ядер Li и Be в диапазоне жесткостей 1–5 ГВ (энергии ядер 0.1–1.5 ГэВ/нуклон) с использованием полетных данных эксперимента RAMELA 2006–2014 гг. о жесткости регистрируемых ядер и их скорости (временнóй анализ и ионизационные потери в многослойном калориметре прибора). Новые результаты эксперимента RAMELA расширяют энергетический диапазон предшествующих измерений, согласуются с существующими немногочисленными результатами и указывают на коррелированные отклонения соотношений изотопов ядер Li и Be от данных GALPROP для ГКЛ, которые можно интерпретировать как свидетельство наблюдения вклада нескольких близких локальных источников на фоне галактических космических лучей. Результаты дополнительного анализа прецизионных данных спектрометра AMS-02 по спектрам позитронов, антипротонов, вторичных ядер Li, Be и B указывают на коррелированные подъемы интенсивности при жесткостях ~50–1000 ГВ, которые можно также связать с локальными источниками. Вклад локальных источников на фоне галактических космических лучей оценен на уровне десятков процентов при жесткостях 1–5 ГВ и на уровне единиц процентов при жесткостях 50–1000 ГВ.

DOI: 10.31857/S0367676523701594, EDN: ONCAHM

ВВЕДЕНИЕ

В космическом эксперименте PAMELA впервые обнаружены [1] источники позитронов с энергией свыше нескольких десятков ГэВ, вероятно связанные с генерацией пар e^+ , e^- вблизи пульсаров в остатках близких (~сотни парсек) сверхновых (SNR) [2]. Потоки этих позитронов на порядки выше фона от галактических космических лучей (ГКЛ). Подобные объекты могут быть также источниками ядер и их поиск возможен, в частности, путем анализа отклонений изотопного состава ядер от ожидаемого в ГКЛ из-за различия условий распространения ядер. Скорее всего, потоки ядер, наблюдаемые в ГКЛ, являются смесью ГКЛ и КЛ от локальных источников (ЛИ), которые могут возникать за счет ядерных взаимодействий ГКЛ с веществом SNR [3], либо генерироваться там за счет энергии пульсаров. Предварительный изотопный анализ ядер Li и Be в гауссовом приближении был проведен нами в 2018 г. [4]. В условиях собранной в эксперименте PAMELA статистики ядер Li и Be использование стандартных методов анализа изотопов показало ограниченность их применения [5]. В настоящем описываемом анализе использованы новые, нестандартные подходы, разработанные в ФТИ РАН.

МЕТОД АНАЛИЗА

Для изотопного анализа отбираются события, прошедшие без ядерных взаимодействий через времяпролетную систему (TOF) и больше 5 слоев вольфрама в калориметре спектрометра PAMELA. Анализ изотопов проводился параллельно одновременно в университете г. Зиген (Германия) с использованием стандартных современных математических методов и в ФТИ с использованием собственного подхода [4]. В условиях хорошей статистики при анализе изотопов ядер H и He результаты были в прекрасном согласии. При анализе изотопов ядер Li и Be в условиях ограниченной статистики обнаружилась ограниченность стандартного подхода [5]. Наряду с отличием экспериментальных распределений от гауссовых, GEANT4 моделирование давало завышенный эффект от рассеяний ядер. Расчетное положение пиков изотопов и FWHM в распределениях по массе и потерях энергии в калориметре согласуется с полетными данными. Для разрешения проблемы в области перекрытия спектров изотопов в ФТИ были впервые использованы распределения, полученные из полетных данных. При селекции изотопов ядер ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ отдельно использовались правые и левые ветви суммарного распределения ${}^6\text{Li} + {}^7\text{Li}$. При селекции ядер ${}^7\text{Be}$ и ${}^9\text{Be}$ аналогично использовались распределения ${}^6\text{Li} + {}^7\text{Li}$

и ${}^{10}\text{B} + {}^{11}\text{B}$, при этом результаты анализа менялись мало. В настоящей работе использован этот подход и полученные результаты вероятно наиболее реалистичны. Такой подход проверен до поиска ядер ${}^{14}\text{C}$ и дал разумные результаты [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В результате анализа полетных данных эксперимента PAMELA в диапазоне жесткостей $\sim 1\text{--}5$ ГВ с шагом по жесткости 0.2 ГВ получены отношения ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$, представленные на рис. 1а–1в. Данные позволяют получить спектры изотопов Li и Be в зависимости от жесткости, преобразовать их в энергетические спектры и получить отношения ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в зависимости от энергии, представленные на рис. 2а–2в. Результаты анализа полетных данных эксперимента PAMELA 2006–2014 гг. для изотопов Li и Be в Космических Лучах (КЛ) дают отклонение от предсказаний для соотношений этих изотопов в ГКЛ и могут указывать на присутствие дополнительного низкоэнергетического компонента предположительно из Локальных источников, таких как близкие SNR. Отклонения от предсказаний GALPROP для ГКЛ наблюдаются для отношений ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ в областях $\sim 0.1\text{--}0.4$ и $0.7\text{--}1.4$ ГэВ/нуклон или $\sim 1\text{--}2$ и $\sim 3.5\text{--}5$ ГВ. Отклонения могут достигать $\sim 30\text{--}40\%$ и вряд ли связаны со статистическими флуктуациями. Отклонения отношения ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ от предсказаний наблюдаются в областях $\sim 0.5\text{--}0.7$ и $\sim 0.8\text{--}1.3$ ГэВ/нуклон или $2.4\text{--}3$ и $\sim 3.2\text{--}5$ ГВ. Данные экспериментов PAMELA и AMS-02 для изотопов H, He и, возможно, антипротонов также могут указывать на подобные “волны” отклонений при жесткостях до 5 ГВ. В области высоких жесткостей свыше ~ 50 ГВ, согласно нашему анализу прецизионных данных AMS-02 [7], при жесткостях порядка 60, 100, 160 и 300 ГВ также наблюдается корреляция возрастных (“волн”) потоков позитронов, антипротонов, вторичных ядер Li, Be и B, которая представлена на рис. 2г. Коррелированное положение небольших подъемов интенсивностей указывает на единую природу их происхождения, а их положение возможно связано с возрастом SNR. Можно попробовать оценить масштаб вклада локальных источников в ГКЛ при жесткостях $\sim 0.1\text{--}1$ ТВ. Для антипротонов с жесткостями выше 100 ГВ эффект оценивается на уровне $\sim 6\%$ над фоном от ГКЛ, и связан, вероятно, с вторичной природой их генерации, причем генерация антипротонов в SNR составляет только $\sim 2\%$ от генерации позитронов.

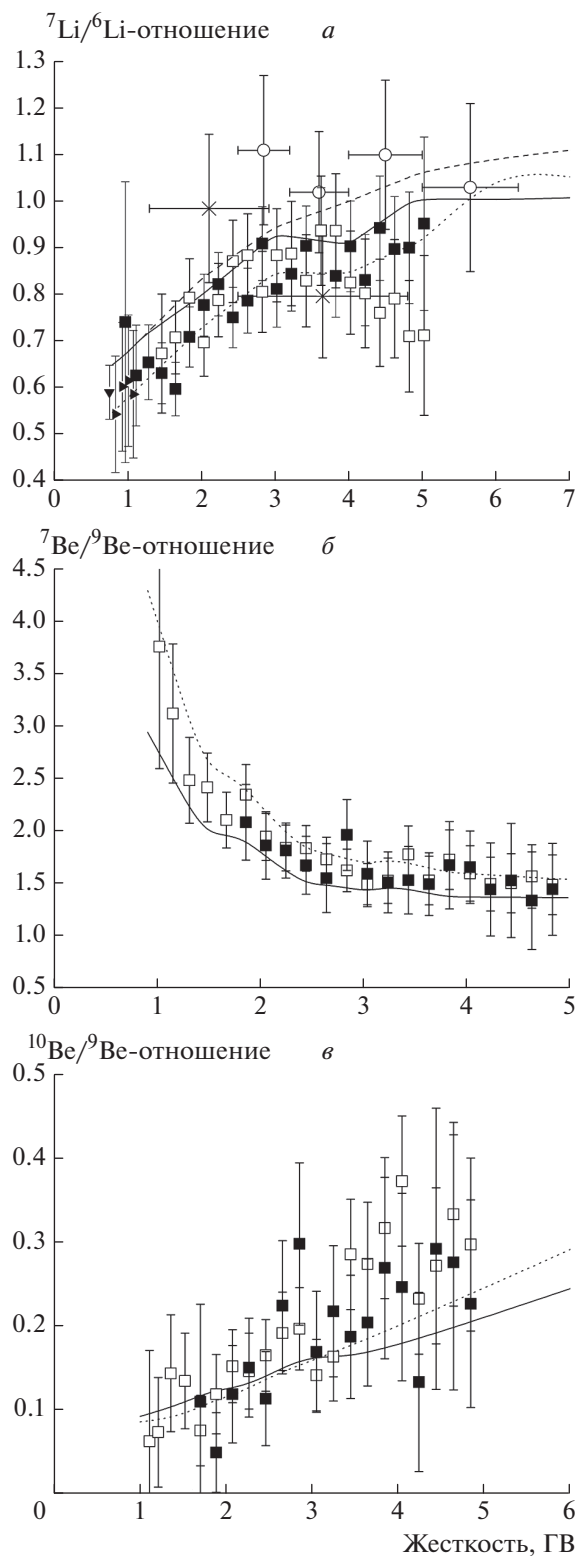


Рис. 1. ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ -отношения в зависимости от жесткости ядер (а): $\square$ – PAMELA, TOF, $\blacksquare$ – PAMELA, калориметр, $\blacktriangleright$ – CRIS (ACE), $\blacktriangledown$ – VOYAGER, $\circ$ – AMS-01, 1998, 600 МВ [8], X – ISOMAX98, 1998, баллон [9]; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [3], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [3], штрих-пунктир – AMS-01 [8]. ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ -отношения в зависимости от жесткости ядер (б): $\square$ – PAMELA, TOF, $\blacksquare$ – PAMELA, калориметр; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [3], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [3]. ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ -отношения в зависимости от жесткости ядер (в): $\square$ – PAMELA, TOF, $\blacksquare$ – PAMELA, калориметр; расчеты, солнечный минимум (500 МВ): линия – Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [3], пунктир – Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [3].

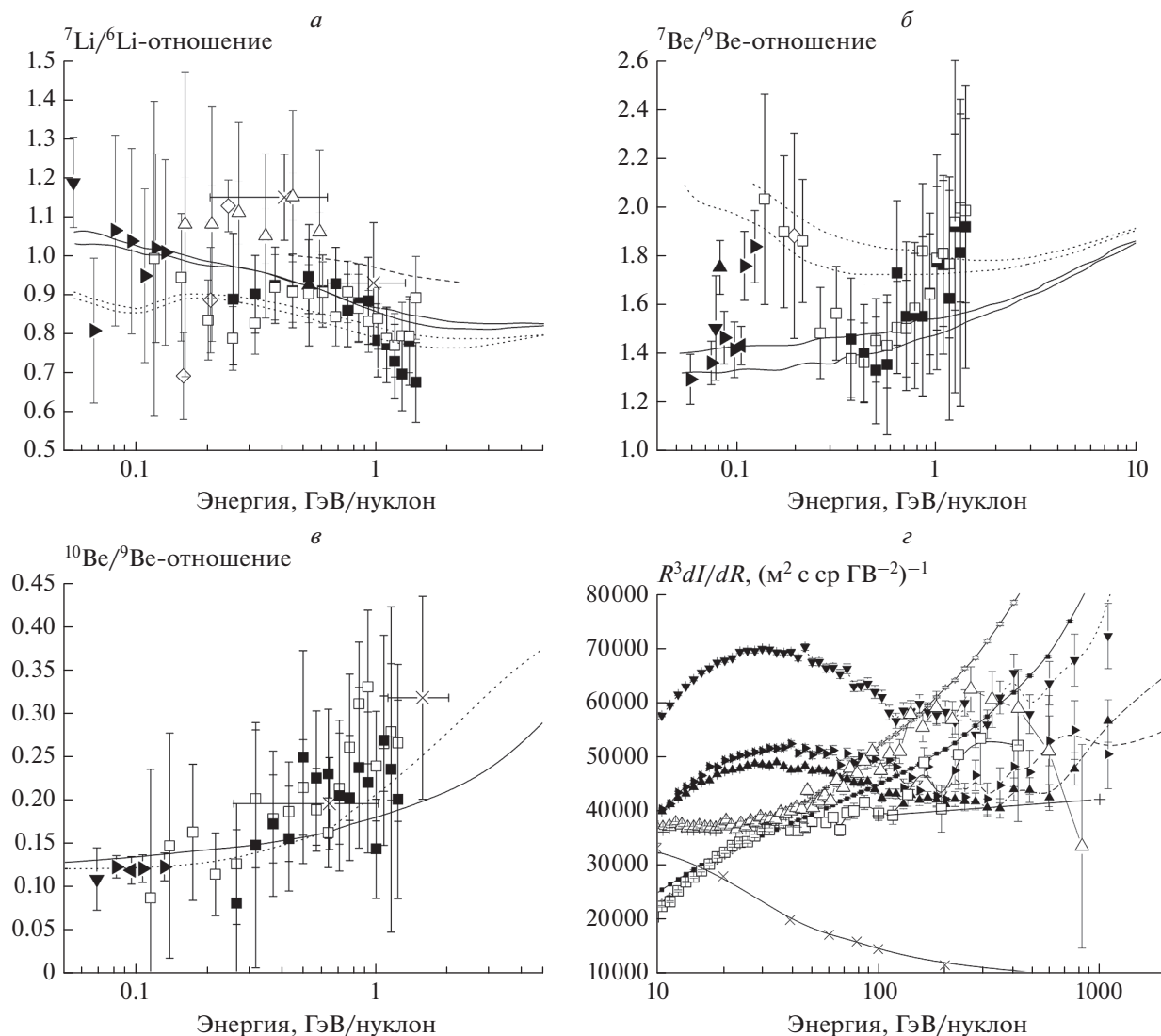


Рис. 2. ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ -отношения в зависимости от энергии ядер (а): $\square$ — PAMELA, TOF, $\blacksquare$ — PAMELA, калориметр, $\blacktriangleright$ — CRIS (ACE), $\blacktriangledown$ — VOYAGER, $\diamond$ — NH, баллон, $\blacktriangle$ — UC, Berkley, $\times$ — ISOMAX98, 1998, баллон [9], Δ — PAMELA [5]; расчеты, солнечный минимум (500 MB): линия — Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [3], пунктир — Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [3], штрих-пунктир — AMS-01 [8]. ${}^7\text{Be}/{}^9\text{Be}$ -отношения в зависимости от энергии ядер (б): $\square$ — PAMELA, TOF, $\blacksquare$ — PAMELA, калориметр, $\blacktriangleright$ — CRIS (ACE), $\blacktriangle$ — IMP-7,8, $\blacktriangledown$ — VOYAGER, $\blacktriangleleft$ — ULYSSES, $\diamond$ — NH, баллон; расчеты, солнечный минимум (500 MB): линия — Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [3], пунктир — Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [3]. ${}^{10}\text{Be}/{}^9\text{Be}$ -отношения в зависимости от энергии ядер (в): $\square$ — PAMELA, TOF, $\blacksquare$ — PAMELA, калориметр, $\blacktriangleright$ — CRIS (ACE), $\blacktriangledown$ — VOYAGER, $\blacktriangleleft$ — ULYSSES, $\times$ — ISOMAX98, 1998, баллон [9]; расчеты, солнечный минимум (500 MB): линия — Moskalenko I.V. et al. (2003) ГКЛ [3], пунктир — Moskalenko I.V. et al. (2003) локальные источники [3]. Спектры ядер AMS-02 [7] (г): $\blacksquare$ — протоны, $\diamond$ — He ($\times 5$), $\square$ — антипротоны ($\times 5000$), Δ — позитроны ($\times 3000$), $\blacktriangledown$ — Li ($\times 2000$), $\blacktriangleright$ — Be ($\times 3000$), $\blacktriangle$ — B ($\times 1000$); расчеты: $\times$ — позитроны ГКЛ ($\times 3000$), $+$ — антипротоны ГКЛ ($\times 5000$) [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженные при анализе данных эксперимента PAMELA для изотопов Li и Be при жесткостях $\sim 1\text{--}5$ ГВ отклонения изотопного состава от ожидаемого для ГКЛ являются вероятным указанием на вклад локальных источников с эффектом на уровне десятков процентов. Анализ данных

AMS-02 при жесткостях $\sim 50\text{--}1000$ ГВ для позитронов, антипротонов и вторичных ядер Li, Be и B указывает на коррелированные подъемы интенсивности с эффектом на уровне единиц процентов от ГКЛ, которые могут быть связаны с процессами в близких SNR обычной вторичной природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al.* // *Nature*. 2009. V. 458. No. 7238. P. 607.
2. *Petrov A.E., Bykov A.M., Osipov S.M.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. V. 1697. Art. No. 012002.
3. *Moskalenko I.V., Strong A.W., Mashnik S.G. et al.* // *arXiv: astro-ph/0306349*. 2003.
4. *Богомолов Э.А., Васильев Г.И.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2019. Т. 83. № 8. С. 1066; *Bogomolov E.A., Vasilyev G.I.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2019. V. 83. No. 8. P. 967.
5. *Menn W., Bogomolov E.A., Simon M. et al.* // *Astrophys. J.* 2018. V. 862. No. 2. P. 141.
6. *Богомолов Э.А., Васильев Г.И., Менн В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2021. Т. 85. № 4. С. 466; *Bogomolov E.A., Vasilyev G.I., Menn W.* // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2021. V. 85. No. 4. P. 341.
7. *Aguilar M., Ali Cavasonza L., Ambrosi G. et al.* // *Phys. Reports*. 2021. V. 894. P. 1.
8. *Aguilar M., Alcaraz J., Allaby J. et al.* // *Astrophys. J.* 2010. V. 724. P. 329.
9. *Hams T., Barbier L.M., Bremerich M. et al.* // *Astrophys. J.* 2004. V. 611. P. 892.

Lithium and beryllium isotopes in the PAMELA experiment

E. A. Bogomolov^{a,*}, G. I. Vasilyev^a, W. Menn^b, O. Adriani^{c,d}, G. A. Bazilevskaya^e, G. C. Barbarino^{f,g}, R. Bellotti^{h,i}, M. Boezio^k, V. Bonvicini^k, M. Bongio^{c,d}, S. Bottai^d, A. Bruno^{h,i}, A. Vacchi^{k,l}, E. Vannuccini^d, S. A. Voronov^j, A. M. Galper^j, C. De Santis^{m,n}, V. Di Felice^{n,o}, G. Zampa^k, N. Zampa^k, M. Casolino^m, D. Campana^g, P. Carlson^p, G. Castellini^q, F. Cafagnaⁱ, A. A. Kvashnin^e, A. N. Kvashnin^e, S. A. Koldobskiy^j, I. A. Lagoida^j, A. A. Leonov^j, A. G. Mayorov^j, V. V. Malakhov^j, M. Martucci^{n,r}, L. Marcelliⁿ, M. Merge^{m,n}, V. V. Mikhailov^j, E. Mocchiutti^k, A. Monaco^{h,i}, N. Mori^d, R. Munini^{k,s}, G. Osteria^g, B. Panico^g, P. Papini^d, P. Picozza^{m,n}, M. Ricci^r, S. B. Ricciarini^d, M. Simon^b, R. Sparvoli^{m,n}, P. Spillantini^{c,d}, Y. I. Stozhkov^e, Y. T. Yurkin^j

^a*Ioffe Physical-Technical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, 194021 Russia*

^b*University Siegen, Siegen, 57068 Germany*

^c*University of Florence, Department of Physics, Florence, 50019 Italy*

^d*INFN, Sezione di Florence, Florence, 50019 Italy*

^e*Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^f*University of Naples "Federico II", Department of Physics, Naples, 80126 Italy*

^g*INFN, Sezione di Naples, Naples, 80126 Italy*

^h*University of Bari, Department of Physics, Bari, 70126 Italy*

ⁱ*INFN, Sezione di Bari, Bari, 70126 Italy*

^j*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

^k*INFN, Sezione di Trieste, Trieste, 34149 Italy*

^l*University of Udine, Department of Mathematics and Informatics, Udine, 33100 Italy*

^m*INFN, Sezione di Rome "Tor Vergata", Rome, 00133 Italy*

ⁿ*University of Rome "Tor Vergata", Department of Physics, Rome, 00133 Italy*

^o*Agenzia Spaziale Italiana, Science Data Center, Rome, 00133 Italy*

^p*KTH Royal Institute of Technology, Department of Physics and the Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova University Centre, Stockholm, 10691 Sweden*

^q*IFAC, Florence, 50019 Italy*

^r*INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, 00044 Italy*

^s*University of Trieste, Department of Physics, Trieste, 34147 Italy*

^{*}*e-mail: Edward.Bogomolov@gmail.com*

Using PAMELA flight data for 2006–2014 on the rigidity of detected nuclei and their velocity (time-of-flight analysis and ionization losses in the multilayer calorimeter of the device), a new analysis of the isotopic composition of Li and Be nuclei in the rigidity range 1–5 GV (nuclear energies 0.1–1.5 GeV/nucleon) was carried out. The new PAMELA data expand the energy range of previous measurements, are consistent with the few existing measurements, and indicate correlated deviations of Li and Be isotope ratios from the GALPROP data for GCRs, which can be interpreted as evidence of the observation of contributions from several nearby local sources against the GCR background. The analysis of precision AMS-02 data on the spectra of positrons, antiprotons, secondary nuclei Li, Be, and B, also carried out in this work, indicates correlated increases in intensity at rigidities of ~50–1000 GV, which could be associated with local sources as well. We estimate the contribution of local sources against the GCR background at the level of tens of percent for rigidities of 1–5 GV and at the level of a few percent for rigidities of 50–1000 GV.