

Зависимость пробега истекания космических лучей в Галактике по данным о протонах и ядрах железа у Земли в области 3–3000 ГВ

О. Н. Стрельникова^{1,a}, Л. Г. Свешникова^{2,b}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики космоса.

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ). Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

E-mail: ^aolga.n.strelnikova@gmail.com, ^btf110@mail.ru

Статья поступила 05.11.2011, подписана в печать 14.12.2011

Простая однородная модель распространения космических лучей в Галактике является адекватной и удобной для анализа данных по спектрам ядер космических лучей с энергией более 1 ГэВ [1, 2]. В этой модели полная информация о распространении сосредоточена в одной величине — пробега истекания X_e , которая представляет собой среднюю пройденную частицей по пути от источника к Земле толщину вещества. В настоящей работе мы предлагаем новый метод определения энергетической зависимости этой величины по соотношению спектров протонов и ядер железа в области умеренных энергий и получаем зависимость пробега истекания от жесткости частицы до энергий несколько ТэВ, опираясь на существующие экспериментальные данные. Полученная таким образом зависимость согласуется с зависимостью, полученной стандартным способом по отношению интенсивности вторичных и первичных ядер. Но при жесткости $R > 300$ ГВ поведение $X_e(R)$ меняется, она становится положе. Рассматриваются возможные причины такого поведения.

Ключевые слова: космические лучи, распространение, пробег истекания.

УДК: 524.1-65. PACS: 96.50.sh.

Введение

В однородной модели распространения космических лучей (КЛ) в Галактике (в иностранной литературе ее называют leaky box) предполагается, что концентрации КЛ, источников и межзвездного газа не зависят от координат, а все распространение КЛ описывается с помощью пробега истекания X_e , зависящего от жесткости частицы R . Этот важный параметр означает количество вещества, пройденного космическими лучами по пути от источника к Земле (его измеряют в г/см² и иногда называют толщиной пройденного вещества). Хотя в диффузионных моделях типа GALPROP [3] такой параметр отсутствует, можно получить оценку некоего аналога эффективной толщины пройденного вещества — X_{eff} , как это было сделано в работе [2] для разных моделей распространения [4]: модели простой диффузии (в иностранной литературе — plain diffusion, или PD), модели диффузии с доускорением (в иностранной литературе — diffusion with reacceleration, или DR), модели диффузии с доускорением и демпингом (в иностранной литературе — diffusion with reacceleration and damping, или DRD) — или в работах [5, 6]. В работе [2] также было показано, что однородная модель является хорошим приближением к диффузионной модели, реализованной в GALPROP — программе, активно использующейся для интерпретаций различных данных о космических лучах [3].

Экспериментально толщина вещества, проходимого космическими лучами, определяется по отношению потоков вторичных, т.е. ядер, образовавшихся во время взаимодействия первичных частиц с проходимым веществом, к первичным ядрам [1]. С увеличением энергии первичной частицы количество пройденного

вещества быстро уменьшается, поэтому уменьшается и количество вторичных ядер, поэтому существенным оказывается знание количества вещества около источника и в остаточной атмосфере.

В настоящей работе мы, опираясь на однородную модель, предлагаем еще один альтернативный подход к определению толщины проходимого вещества в области до 3 ТВ по экспериментальным данным.

1. Метод получения экспериментальной зависимости $X_{\text{eff}}(R)$

В настоящей работе мы предлагаем метод экспериментального определения толщины проходимого вещества и ее зависимости от энергии по отношению потоков протонов и ядер железа, опираясь на полученные доказательства применимости однородной модели к описанию спектров ядер космических лучей [1, 2].

Интенсивность I_a стабильных ядер КЛ типа A у Земли связана с их спектром в источнике Q_a (энергетическими потерями пренебрегаем) соотношением

$$I_a = \frac{Q_a(R)}{4\pi\rho} \frac{1}{\frac{1}{X_{\text{eff}}} + \frac{1}{X_{\text{in}}^A}}, \quad (1)$$

где ρ — плотность межзвездного газа, X_{in}^A — пробег взаимодействия для ядер A (взяты из GALPROP). Для протонов $X_{\text{in}}^H \sim 100$ г/см² при жесткости 1 ГВ и ~ 70 г/см² при 10 ТВ, а $X_{\text{eff}} = 10\text{--}20$ г/см² [2], т.е. $X_{\text{eff}} \ll X_{\text{in}}^H$, откуда и из (1) получаются известные соотношения

$$I_H \sim Q_H \cdot X_{\text{eff}}, \quad \gamma_{\text{obs}} = \gamma_{\text{sour}} + \alpha, \quad (2)$$

где α — показатель степени зависимости $X_{\text{eff}}(R)$, γ_{obs} и γ_{sour} — показатели степени наблюдаемого спектра и спектра в источнике соответственно.

Для ядер железа пробег взаимодействия гораздо меньше, $X_{in}^{Fe} \sim 2.7 \text{ г/см}^2$, и существует такая область жесткости $R > R_{max}$, где величина X_{eff} больше X_{in}^{Fe} , и соотношение (1) дает

$$I_{Fe} \sim Q_{Fe} * X_{in}^{Fe}, \quad \gamma_{obs} \sim \gamma_{sour}, \quad (3)$$

т.е. при жесткости $R > R_{max}$ форма спектра железа повторяет спектр в источнике. Следует обратить внимание на то, что значение R_{max} зависит от поведения X_{eff} , которое в различных моделях распространения КЛ разное.

Отношение спектров тяжелых и легких ядер должно быть чувствительно к величине X_{eff} в интервале жесткости, в котором величина X_{eff} сравнима с X_{in}^{Fe} , т.е. 3–3000 ГэВ. Опираясь на однородное приближение [2], можно попытаться оценить величину $X_{eff}(R)$ в указанной области жесткости. Для этого запишем выражения для спектров протонов и железа с помощью формулы (1), разделив одно выражение на другое, получим формулу для X_{eff} :

$$X_{eff} = \frac{\frac{I_H}{I_{Fe}} \frac{Q_{Fe}}{Q_H} - 1}{\frac{1}{X_{in}^{Fe}} - \frac{I_H}{I_{Fe}} \frac{Q_{Fe}}{Q_H} \frac{1}{X_{in}^H}}$$

и с учетом первой формулы (2)

$$X_{eff} = X_{in}^{Fe} \left(\frac{I_H}{I_{Fe}} \frac{Q_{Fe}}{Q_H} - 1 \right). \quad (4)$$

При этом

1) необходимо иметь в виду, что независимость X_e от сечения взаимодействия ядер, использовавшаяся в работе [2] для получения приближения однородной модели к диффузионной, является свойством однородной модели, а X_{eff} не зависит от сечения только для определенного типа ядер;

2) полагаем, что ядра различных типов образуются в одних и тех же источниках, и химический состав ускоренных частиц в источнике не зависит от жесткости в рассматриваемом интервале жесткости: $Q_{Fe}(R)/Q_H(R) = const$;

4) относительное количество продуктов фрагментации среди ядер рассматриваемых групп должно быть пренебрежимо малым;

5) необходимо найти способ оценки отношения $Q_{Fe}(R)/Q_H(R)$.

Ядра протонов и железа являются наиболее удобными для решения поставленной задачи, но возникает важный вопрос: достаточно ли для этого существующих экспериментальных данных?

2. Экспериментальные данные

Интервал жесткости 3–3000 ГВ соответствует энергетическому интервалу 3–3000 ГэВ для протонов и 80 ГэВ — 80 ТэВ для ядер железа, поэтому нам придется анализировать данные разных экспериментов. Поставленная задача в принципе может быть решена благодаря существованию данных эксперимента TRACER [7], измерившему спектр ядер железа в широком диапазоне энергий от 30 ГэВ/нуклон до 80 ТэВ/нуклон. Также очень важны данные эксперимента ATIC2 [8], так как они заполняют разрыв между

результатами экспериментов с магнитными спектрометрами и экспериментов с калориметрами и эмульсиями.

Мы рассматриваем только экспериментальные точки, удовлетворяющие трем условиям:

- 1) энергия в интервале от 3 до 10 000 ГэВ/нуклон,
- 2) экспериментальные ошибки не превышают 30%,
- 3) установка была калибрована на ускорителях (по этому критерию были не приняты в расчет данные эксперимента СОКОЛ).

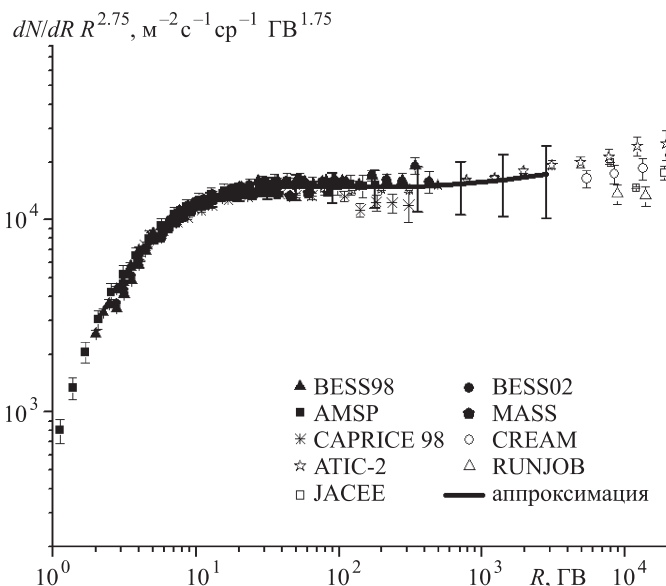


Рис. 1. Спектр протонов у Земли по данным экспериментов MASS-91 [9], BESS-98 [10], BESS-02 [11], AMS [12, 13, 14], ATIC-2 [8], CREAM [15], JACEE [16, 17], RUNJOB [18], приведенный к модуляционному потенциалу $\Phi = 800 \text{ МВ}$, и его аппроксимация полиномом пятой степени

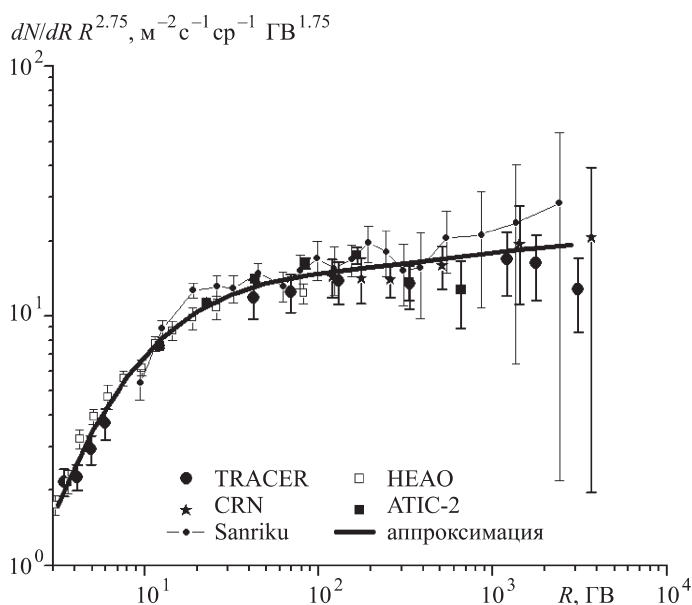


Рис. 2. Спектр ядер железа у Земли по данным экспериментов HEAO-3 [19], CRN [20], TRACER [7, 21, 22], Sanriku [22], приведенный к модуляционному потенциалу $\Phi = 800 \text{ МВ}$, и его аппроксимация полиномом пятой степени

На рис. 1 и 2 представлены экспериментальные данные по спектрам протонов и ядер железа, приведенные от энергии к жесткости. Точки, отвечающие критериям, приведенным выше, отмечены закрашенными символами. Данные по протонам взяты из экспериментов MASS-91 [9], BESS-98 [10], BESS-02 [11], AMS [12–14], ATIC-2 [8], CREAM [15], JACEE [16, 17], RUNJOB [18]. Данные по ядрам железа были взяты из экспериментов HEAO-3 [19], CRN [20], TRACER [21, 22, 7], Sanriku [22]. Все данные были приведены к модуляционному потенциалу $\Phi = 800$ МВ способом, описанным в [14]. Разброс точек, удовлетворяющих приведенным выше условиям, невелик. Для дальнейшей работы необходимо аппроксимировать спектры протонов и железа. На рис. 1 и 2 показаны наилучшие аппроксимации полиномом пятой степени.

3. Результаты

Формула (4) для расчета величины X_{eff} применима только в области жесткости $R_{\text{min}} \div R_{\text{max}}$, где величина X_{eff} сравнима с $X_{\text{in}}^{\text{Fe}}$. При $R > R_{\text{max}}$ величина $X_{\text{eff}} \rightarrow 0$, $I_{\text{H}}/I_{\text{Fe}} \rightarrow Q_{\text{H}}/Q_{\text{Fe}}$. Для иллюстрации области применения уравнения (4) выберем величину R_{max} , соответствующую $X_{\text{eff}} = 0.1X_{\text{in}}^{\text{Fe}} \sim 0.27$ г/см². В области $R > R_{\text{max}}$ спектры в асимптотике параллельны и не зависят от величины X_{eff} , отсюда можно найти примерное отношение интенсивности протонов и железа в источнике $Q_{\text{H}}/Q_{\text{Fe}}$. Для трех моделей распространения, описанных в GALPROP, величины R_{max} следующие:

- 1) $R_{\text{max}} = 3.6$ ТВ для модели простой диффузии (показатель степени в зависимости пробега истечения от жесткости $\alpha = -0.6$);
- 2) $R_{\text{max}} = 6.9$ ТВ для модели диффузии с доускорением и демпингом ($\alpha = -0.5$);
- 3) $R_{\text{max}} = 46.8$ ТВ для модели диффузии с доускорением ($\alpha = -0.34$);
- 4) $R_{\text{max}} = 69000$ ТВ для модели диффузии с доускорением ($\alpha = -0.2$) в случае очень пологой зависимости $X_{\text{eff}} = 10R^{-0.2}$, рассматриваемой в [5] для объяснения колена в спектре КЛ из-за смены механизма распространения.

Таким образом, величина R_{max} , сравнимая с аналогичной экспериментальной величиной $R = 2.8$ ТВ, может возникать только в моделях распространения с очень крутой зависимостью величины X_{eff} от жесткости — в модели простой диффузии или диффузии с доускорением и демпингом [4]. В этом случае, принимая в расчет минимальную оценку интенсивности протонов и ядер железа в области жесткости более 2.8 ТэВ, мы получили $Q_{\text{H}}/Q_{\text{Fe}} = 800 \div 1000$.

В результате расчета зависимости $X_{\text{eff}}(R)$ по формуле (4) для аппроксимации величин I_{H} и I_{Fe} и отношения $Q_{\text{H}}/Q_{\text{Fe}} = 800$ мы получили оценку $X_{\text{eff}} = 4.6(R/5 \text{ ГВ})^{-0.65}$, что значительно меньше ожидаемой из экспериментальных данных по отношению спектров бора и углерода. Это означает, что наше предположение о крутой зависимости X_{eff} от энергии в области $R > 300$ ГВ не совсем правильно.

При анализе пологих зависимостей $X_{\text{eff}}(R)$ при $R_{\text{max}} \gg 3$ ТВ нет возможности оценить асимптотические значения I_{H} и I_{Fe} . Поэтому мы нормировали результаты расчетов $X_{\text{eff}}(R)$ на экспериментальную ве-

личину в точке $R = 50$ ГВ. Величина $X_{\text{eff}}^{\text{B/C}}$, полученная по данным экспериментов по измерению отношения интенсивностей ядер бора и углерода, лежит в диапазоне от 2.8 г/см² (модель диффузии с доускорением) до 3.45 г/см² (модель простой диффузии). Точка для нормировки была выбрана $R = 50$ ГВ, так как при этой жесткости данные разных экспериментов по определению В/С согласуются между собой [23], а также при жесткости выше этого значения вклад процессов доускорения при распространении должен быть невелик.

По данным об интенсивности ядер бора и углерода у Земли, как было сказано выше, $X_{\text{eff}}^{\text{B/C}}(50 \text{ ТВ}) \sim 2.8\text{--}3.45$ г/см², и отношению аппроксимированных $I_{\text{H}}/I_{\text{Fe}} = 1067 \pm 40$ по формуле (4) мы оценили отношение спектров в источнике: $Q_{\text{H}}/Q_{\text{Fe}} = 490 \div 535$. Подставляя полученные значения параметров и отношения аппроксимированных значений интенсивности протонов и ядер железа в формулу (4), мы получили два варианта зависимости $X_{\text{eff}}(R)$; они представлены на рис. 3. Верхняя зависимость получена в предположении $Q_{\text{H}}/Q_{\text{Fe}} = 490$, а нижняя — при 535. Эти зависимости в интервале жесткости 3–300 ГВ могут быть аппроксимированы выражениями $X_{\text{eff}}(R) \sim 3.46(R/50 \text{ ГВ})^{-0.47 \pm 0.03}$ и $X_{\text{eff}}(R) \sim 2.7(R/50 \text{ ГВ})^{-0.50 \pm 0.03}$ соответственно.

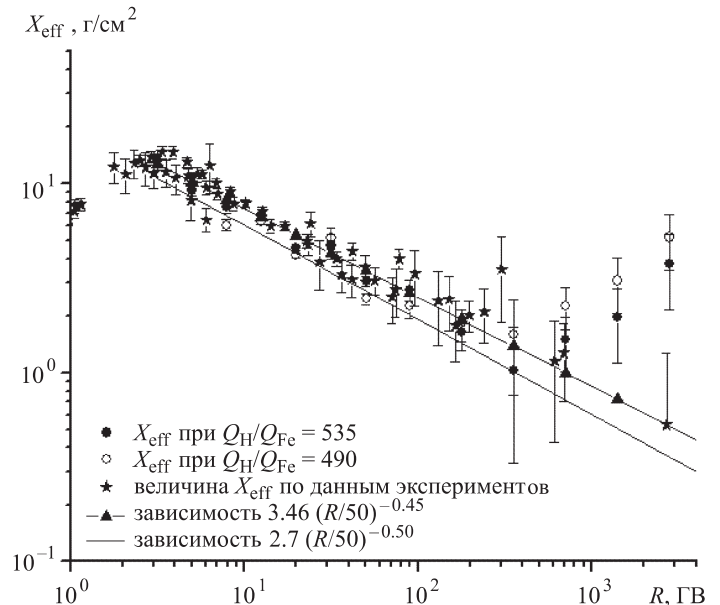


Рис. 3. Результаты расчетов величины X_{eff} по данным о протонах и ядрах железа у Земли в сравнении с величиной X_{eff} , полученной по экспериментальным данным отношения потоков бора и углерода, взятых из работы [4], и их аппроксимации

Заключение

В настоящей работе мы предлагаем новый метод определения энергетической зависимости пробега истечения космических лучей (или толщи пройденного вещества) по соотношению спектров протонов и ядер железа в области умеренных энергий. На основе существующих экспериментальных данных получена зависимость пробега истечения от жесткости частицы до энергий в несколько ТэВ, опираясь на существующие экспериментальные данные. До жесткости 300 ГВ

полученная нами зависимость пробега истекания от жесткости хорошо согласуется с аналогичной зависимостью, полученной стандартным способом по отношению интенсивностей вторичных и первичных ядер. Из этого следует, что сделанные предположения о том, что спектры в источниках для разных ядер являются одинаковыми по жесткости, верны в этой области энергий. Но при $R > 300$ ГВ поведение полученной нами зависимости $X_{\text{eff}}(R)$ меняется. Это означает, что при таких энергиях либо изменяется процесс диффузии — она становится более медленной, — либо изменяется соотношение спектров протонов и тяжелых ядер в источниках, либо в этой области энергии меняется тип источников КЛ. С помощью одновременного анализа анизотропии КЛ, отношения потока ядер бора к потоку углерода, потока антипротонов и отношения потока антипротонов к потоку протонов можно попытаться определить, какая из гипотез более правдоподобна [24]. Но, к сожалению, для такого анализа пока недостаточно экспериментальных данных, а имеющиеся данные противоречивы. Стоит, однако, отметить, что из последних данных TRACER [25] по потокам бора и углерода следует некоторое «уположение» или даже рост зависимости $X_{\text{eff}}(R)$ в области жесткости более 200 ГВ, что указывает на изменение процессов распространения.

Авторы выражают глубокую благодарность за дискуссию и поддержку В. С. Птускину.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 10-02-1443-а) и Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-3517.2010.2).

Список литературы

1. Березинский В.С., Буланов С.В., Гинзбург В.Л. и др. Астрофизика космических лучей. М., 1990.
2. Ptuskin V., Strelnikova O., Sveshnikova L. // *Astrop. Phys.* 2009. **31**. P. 284.
3. Strong A., Moskalenko I. // *Astrophys. J.* 1998. **509**. P. 212.
4. Ptuskin V.S., Moskalenko I.V., Jones F.C. et al. // *Astrophys. J.* 2006. **642**. P. 902.
5. Kalmykov N., Timohin A. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics.* 2006. **71**, № 4. P. 487.
6. Jones F.C., Lukasiak A., Ptuskin V. et al. // *Astrophys. J.* 2001. **547**. P. 264.
7. Ave M., Boyle P., Gahbauer F. et al. // *Astrophys. J.* 2008. **678**. P. 262.
8. Panov A.D., Adams J.H., Ahn H.S. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics.* 2009. **73**. P. 5.
9. Cireella M., Ambriola M., Barbiellini G. et al. // *Adv. in Space Res.* 2001. **27**, N 4. P. 755.
10. Sanuki T., Motoki M., Matsumoto H. et al. // *Astrophys. J.* 2000. **545**. P. 1135.
11. Yamamoto A. // *Proc. 28th ICRC. Tsukuba, 2003.* **8**. P. 347.
12. Alcaraz J., Alpat B., Ambrosi G. et al. // *Phys. Let. B.* 2000. **494**. P. 193.
13. Aguilar M., Alcaraz J., Allaby J. et al. // *Phys. Rep.* 2002. **366**. P. 331.
14. Boezio M., Carlson P., Francke T. et al. // *Astrophys. J.* 1999. **518**. P. 457.
15. Seo E.S., Ahn H.S., Allison P.S. et al. // *Proc. 30th ICRC. Merida, 2007.* **2**. P. 47.
16. Asakimori K., Burnett T.H., Cherry M.L. et al. // *Astrophys. J.* 1998. **502**. P. 278.
17. Cherry M. // *Proc. 25th ICRC. Durban, 1997.* **4**. P. 1.
18. Derbina V.A., Galkin V.I., Hareyama M. et al. // *Astrophys. J.* 2005. **41**. P. 2.
19. Englemann J., Ferrando P., Soutoul A. et al. // *Astron. Astrophys.* 1990. **233**. P. 96.
20. Muller D., Swordy D., L'Heureux S. et al. // *Astrophys. J.* 1991. **374**. P. 356.
21. Ave M., Boyle P.J., Hoppner C. et al. // *Proc. 30th ICRC. Merida, 2007.* **2**. P. 215.
22. Ichimura M., Kogawa M., Kuramataet S. et al. // *Phys. Rev. D.* 1993. **48**. P. 1949.
23. Strong A.W., Moskalenko I.V., Ptuskin V. et al. // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2007. **57**. P. 285.
24. Porter T.A., Vladimirov A.E., Moscalenko I.V. et al. // *Proc. 32nd ICRC. Beijing, 2011.* В подготовке.
25. Boyle P.J., Ave M., Horandel J.R. et al. // *Proc. 32nd ICRC. Beijing, 2011.* В подготовке.

Rigidity dependence of cosmic ray escape length in the Galaxy obtained from a comparison of proton and iron spectra in the range 3–3000 GV

O. N. Strelnikova^{1,a}, L. G. Sveshnikova^{2,b}

¹Department of Space Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University.

²D. V. Scobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aolga.n.strelnikova@gmail.com, ^btfl10@mail.ru.

A simple leaky-box model of propagation of cosmic rays in the Galaxy is quite suitable for handling of data on cosmic ray nuclei energy spectra and composition at energy under 1 GeV [1, 2]. In this model a full information about cosmic ray propagation in Galaxy is compressed to the single parameter — escape length, X_e , that characterizes mean grams of matter passed by cosmic rays from sources to the Earth. In this paper we analyze the world data on proton and iron cosmic ray spectra collected in experiments and obtain the rigidity dependence of escape length from the measured rigidity dependence of the protons/iron ratio. It quite agrees with the one estimated by standard manner from the secondary/primary nuclei ratio. But at $R > 300$ GV the behavior of $X_e(R)$ distinctly changes, that can point out to the change of proton/iron ratio in cosmic ray sources.

Key words: cosmic rays, propagation, escape length.

PACS: 96.50.sh.

Received 5 November 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 2(2012).

Сведения об авторах

1. Стрельникова Ольга Николаевна — аспирант; тел.: (495) 939-13-91; e-mail: olga.n.strelnikova@gmail.com.

2. Свешникова Любовь Георгиевна — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-13-91; e-mail: tfl10@mail.ru.