

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНОВ, ОБРАЗУЕМЫХ МЮОНАМИ В СТАНДАРТНОМ ГРУНТЕ

© 2015 г. А. С. Мальгин*

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Поступила в редакцию 13.02.2015 г.

Для стандартного грунта определены характеристики космогенных нейтронов, такие, как выход, темп образования, поток. Получены зависимости этих величин от глубины стандартного грунта и средней энергии мюонов. Данные характеристики и зависимости для стандартного грунта позволяют просто оценить фон нейтронов, производимый мюонами в подземных лабораториях при различном химическом составе грунта.

DOI: 10.7868/S0044002715100104

ВВЕДЕНИЕ

Расчеты выхода нейтронов, генерируемых мюонами космических лучей в грунте (космогенные нейтроны), являются важной частью исследований характеристик потока нейтронов (выхода Y , темпа образования R , потока $F(T_n)$, спектра dN/dT_n), создающих фон в подземных низкофоновых экспериментах. Выходом Y называется число нейтронов, генерируемых мюоном с энергией E_μ на длине пробега 1 г/см^2 в веществе с данным массовым числом A .

Подземные эксперименты проводятся в выработках самого различного грунта — от гипса и соли до известняка и гранита. Поскольку выход нейтронов связан с величиной A и энергией мюонов, фон, создаваемый мюонами, зависит от химического состава грунта, окружающего экспериментальную установку, и глубины H расположения последней. Для приведения к стандартным условиям глубину выражают или в метрах водного эквивалента (м.в.э.), или в гектограммах стандартного грунта ($1 \text{ г} = 100 \text{ г/см}^2$). Стандартный грунт — это гипотетическое вещество, характеристики которого $A = 22$, $Z = 11$, $\rho = 2.65 \text{ г/см}^3$ близки к средним характеристикам наиболее распространенных горных пород. Выражать глубину экспериментов в единицах стандартного грунта было предложено в 1967 г. [1] для учета влияния химсостава грунта на энергопотери мюона, что не достигается приведением к м.в.э. Энергопотери мюона зависят от Z/A (ионизационные потери) и Z^2/A (образование пар, тормозное излучение). Использование в расчете стандартного грунта позволяет просто

оценить поток космогенных нейтронов в подземном эксперименте без предварительного исследования химсостава окружающего грунта.

Результаты первого расчета выхода нейтронов и его зависимости от \bar{E}_μ были представлены в работах [2, 3]. Расчет относился авторами к грунту, но был выполнен с использованием имевшихся на тот момент экспериментальных данных для вещества с $A = 27$ и $Z = 13$, т.е. для алюминия. Было получено, что зависимость выхода от \bar{E}_μ можно описать функцией $\text{const} \cdot \bar{E}_\mu^\alpha$, где $\alpha \sim 0.7$. При этом результаты расчета, представленные графически в [2], лучше согласуются с $\alpha \sim 0.75$. В последующих публикациях [3–6] графические представления расчета [2] отличаются друг от друга, сохраняя величину показателя $\alpha \sim 0.75$. Если зависимость $Y(E_\mu)$ записать в виде $Y = a\bar{E}_\mu^{0.75}$, то значения коэффициента a в этих представлениях оказываются в интервале от $a_{\min} = 4.1 \times 10^{-6}$ [4] до $a_{\max} = 7.5 \times 10^{-6}$ [5]. В проведенных затем измерениях [5–9] были получены величины выхода для различных \bar{E}_μ . В работе [10] результаты измерений [5] и расчета [2] были приписаны стандартному грунту. Вместе с тем в публикациях [6, 7, 11, 12] измеренные в экспериментах [5] выходы авторами относились к жидкому сцинтиллятору ($C_n H_{2n}$, $\bar{n} = 9.6$, $\bar{A} = 10.3$, $\rho = 0.78 \text{ г/см}^3$) и констатировалось их согласие с расчетом [2] ($a \approx 6 \times 10^{-6}$, $\alpha \approx 0.75$). Последнее может быть справедливым только в случае неверного допущения о независимости выхода от A . Выход нейтронов для алюминия, точнее функция генерации нейтронов $\langle \nu \sigma \rangle / A$, был рассчитан также в [13]. Функция $\langle \nu \sigma \rangle / A$ связана с выходом числом Авогадро N_0 : $Y = N_0 \times$

*E-mail: malgin@lngs.infn.it

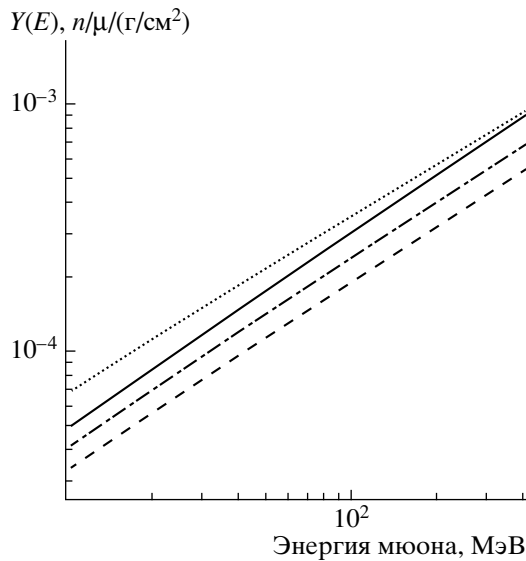


Рис. 1. Выход космогенных нейтронов. Кривые: точечная (алюминий) — $Y = 14 \times 10^{-6} \bar{E}_\mu^{0.70}$ [13]; сплошная (стандартный грунт $A = 22$, расчет по UF) — $Y = 8.3 \times 10^{-6} \bar{E}_\mu^{0.78}$; штрихпунктирная (алюминий) — $Y = 7.5 \times 10^{-6} \bar{E}_\mu^{0.75}$ [5]; штриховая (алюминий) — $Y = 6 \times 10^{-6} \bar{E}_\mu^{0.75}$ [2].

$(\langle \nu \sigma \rangle / A)$, ν — множественность нейтронов, σ — сечение μA -взаимодействия. Результат расчета [13] в диапазоне энергий $\bar{E}_\mu = 10$ –400 ГэВ можно аппроксимировать, в среднем, зависимостью $Y = 1.4 \times 10^{-5} \bar{E}_\mu^{0.70}$. Данная зависимость в диапазоне $\bar{E}_\mu = 10$ –400 ГэВ в ~ 1.9 раза превышает результат расчета [2], который описывается функцией $Y = 6 \times 10^{-6} \bar{E}_\mu^{0.75}$, и в ~ 1.5 раза превышает зависимость с максимальными значениями выхода $Y = a_{\max} \bar{E}_\mu^{0.75}$, показанную на графике в [5].

Неоднозначность графических представлений одних и тех же расчетов [2, 4], декларируемое авторами согласие расчетной зависимости $Y = 6 \times 10^{-6} \bar{E}_\mu^{0.75}$, полученной для алюминия, с экспериментальными данными как для жидкого сцинтиллятора, так и для стандартного грунта, а также наличие расчета [13], дающего более высокие значения для алюминия, — все эти факты говорят о противоречивости ранних расчетов выхода нейтронов. Кроме того, ни один из расчетов не имел отношения к стандартному грунту.

В современных работах результаты расчета выхода нейтронов для стандартного грунта и его зависимости от \bar{E}_μ и H не публиковались. Таким образом, сегодня нет расчетных характеристик космогенных нейтронов для стандартного грунта. Сейчас появилась возможность получить эти

характеристики аналитически, используя универсальную формулу (UF) для выхода космогенных нейтронов, предложенную в [14, 15].

1. УНИВЕРСАЛЬНАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ ВЫХОДА КОСМОГЕННЫХ НЕЙТРОНОВ. ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ ОТ \bar{E}_μ И H ДЛЯ СТАНДАРТНОГО ГРУНТА

Универсальная формула имеет вид

$$Y(\bar{E}_\mu, A) = b_n \bar{E}_\mu^\alpha A^\beta. \quad (1)$$

Значения констант $b_n = 4.4 \times 10^{-7}$ ($\text{г}^{-1} \text{см}^2$), $\alpha = 0.78$, $\beta = 0.95$ были определены на основе данных измерения выхода для сцинтиллятора, Fe и Pb, полученных за 60 лет исследования генерации нейтронов мюонами [14, 15]. Коэффициент b_n представляет относительные энергопотери мюона, определяющие генерацию нейтронов. В диапазоне возможных значений \bar{E}_μ в современных подземных экспериментах 40–400 ГэВ величина b_n практически не изменяется. Она также пренебрежимо слабо зависит от A . Действенность UF подтверждается согласием расчета выхода по этой формуле для сцинтиллятора ($Y_{\text{sc}} = (3.3 \pm 0.5) \times 10^{-4} \text{ н/}\mu\text{/}(\text{г/}\text{см}^2)$, $\bar{E}_\mu = 280$ ГэВ) и свинца ($Y_{\text{Pb}} = (53 \pm 8) \times 10^{-4} \text{ н/}\mu\text{/}(\text{г/}\text{см}^2)$, $\bar{E}_\mu = 260$ ГэВ) с недавними измерениями в экспериментах Vogex-ino ($Y_{\text{sc}} = (3.10 \pm 0.11) \times 10^{-4} \text{ н/}\mu\text{/}(\text{г/}\text{см}^2)$) [16] и ZEP-LIN-III ($Y_{\text{Pb}} = (58 \pm 2) \times 10^{-4} \text{ н/}\mu\text{/}(\text{г/}\text{см}^2)$) [17].

Функция $Y(\bar{E}_\mu)$ для стандартного грунта, рассчитанная с помощью UF, и алюминия [13, 5, 2] показана на рис. 1. Видим, что выход, полученный в [2] для $A = 27$, меньше рассчитанного по UF для $A = 22$ в ~ 1.5 раза.

Для перехода от $Y(\bar{E}_\mu)$ к зависимости $Y(H)$ необходимо задать связь \bar{E}_μ с H . Значения функции $\bar{E}_\mu(H)$, определенные по формулам из работ [18–20] при фиксированной глубине H_0 , характеризуются большим разбросом. Это наблюдается в совокупности значений глубин и энергий, используемых авторами в различных экспериментах по измерению выхода нейтронов [5–8, 13, 21–24] (рис. 2). Ниже будет использоваться связь между \bar{E}_μ и H в виде

$$\bar{E}_\mu = \frac{\varepsilon_\mu}{\gamma_\mu - 2} [1 - \exp(-bH)]. \quad (2)$$

В работе [19] параметрам ε_μ , γ_μ , и b для стандартного грунта и плоской поверхности были присвоены значения 693 ГэВ, 3.77 и 0.4 (км в.э.) $^{-1}$ соответственно (кривая 2 на рис. 2). При этих

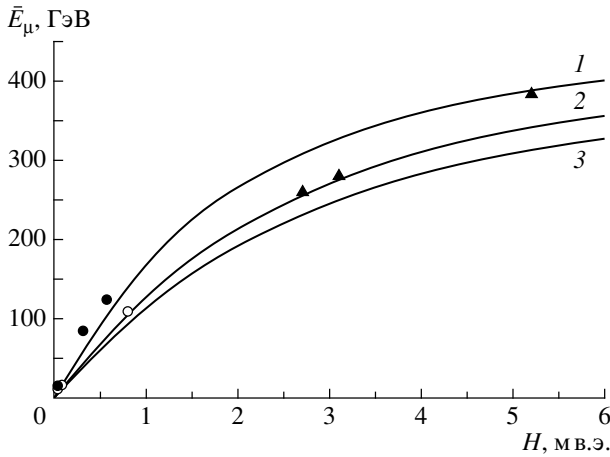


Рис. 2. Зависимости $\bar{E}_\mu(H)$. Кривые — расчет при различных значениях параметров $\varepsilon_\mu, b, \gamma_\mu$ в выражении (2) (1 — [18], 2 — [19], 3 — [20]). Точки: ○ — эксперименты по измерению выхода нейтронов на разных глубинах [13, 21, 22]; ● — [5, 6]; ▲ — [7, 8, 23, 24].

значениях достигается наилучшее согласие результатов единственного измерения средней энергии одиночных мюонов в эксперименте MACRO [25] и расчета. Результаты расчета функции $Y(H)$ с помощью выражения (2), а также аналогичная функция из [2] при определении глубины H по формуле (2) показаны на рис. 3.

2. ТЕМП ОБРАЗОВАНИЯ И ПОТОК КОСМОГЕННЫХ НЕЙТРОНОВ

Темп образования нейтронов $R(H)$ в стандартном грунте и поток нейтронов $F(H)$ на границе “камера–грунт” на глубине H необходимы для оценки фоновых эффектов в подземных экспериментах. Поток $F(H)$ выражается через $R(H)$ и площадь поверхности камеры S_c :

$$F(H) = R(H)/S_c. \tag{3}$$

Темп образования нейтронов в объеме грунта V зависит от глобальной интенсивности мюонов $I_\mu(H)$ и выхода $Y(H)$:

$$R(H) = I_\mu(H)V\rho Y(H) [n \text{ с}^{-1}], \tag{4}$$

где ρ — плотность грунта.

Объем V определяется эффективной толщиной l_n слоя грунта, окружающего камеру, из которого в нее поступают нейтроны. В современных экспериментах характерные размеры подземных помещений гораздо больше l_n , следовательно,

$$V \approx S_c l_n. \tag{5}$$

Подставляя (4), (5) в выражение (3), получаем

$$F(H) = I_\mu(H)Y(H)l_n\rho [n \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}]. \tag{6}$$

Произведение $l_n\rho$ (г см^{-2}) является длиной релаксации λ , характеризующей ослабление k изотропного потока нейтронов в грунте: $k = \exp(-L/\lambda)$, L (г см^{-2}) — толщина слоя грунта. Следовательно, формула (6) представляет определение потока космогенных нейтронов в грунте на глубине H .

Имеющиеся экспериментальные данные [26, 27] для двух веществ, наиболее близких по физическим свойствам к стандартному грунту, — кварца (SiO_2 , $\bar{A} = 20$, $\bar{Z} = 10$, $\rho = 2.65 \text{ г/см}^3$) и алюминия ($A = 27$, $Z = 13$, $\rho = 2.7 \text{ г/см}^3$), в интервале энергий нейтронов T_n от 1 до 10 МэВ дают эффективные величины $\lambda(\text{SiO}_2) \approx 30 \text{ г/см}^2$, $\lambda(\text{Al}) \approx 40 \text{ г/см}^2$ (в области энергий до 10 МэВ находится около 70% нейтронов, образуемых мюонами в грунте). Для энергии $T_n \sim 20$ МэВ длина λ увеличивается на 10%. От состава породы, окружающей подземную камеру (бетон, соль, известняк, базальт, гранит), длина релаксации зависит слабо. Для наших оценок потока нейтронов в стандартном грунте выберем $\lambda = 35 \text{ г/см}^2$. Подставляя эту величину в (6) и записывая выход Y в виде (1) при $A = 22$, получаем поток нейтронов, выходящих из грунта через границу “камера–стандартный грунт”:

$$F(h) = 2.9 \times 10^{-4} I_\mu(h) \bar{E}_\mu^{0.78}(h) [n \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}]. \tag{7}$$

Для интенсивности I_μ используем формулу из работы [28]:

$$I_\mu(h) = a_1 \exp(-h/c_1) + a_2 \exp(-h/c_2), \tag{8}$$

где $a_1 = 68 \times 10^{-6}$, $a_2 = 2.1 \times 10^{-6}$, $c_1 = 0.285$, $c_2 = 0.698$, h — вертикальная глубина под плоской поверхностью в км в.э.

Зависимость (7) вместе с результатами расчетов потока нейтронов [28–30] показана на рис. 4. Диапазон h охватывает глубины расположения современных подземных лабораторий от 0.5 до 6 км в.э., которым, согласно выражению (2), соответствуют энергии $\bar{E}_\mu = 70$ и 360 ГэВ.

Следует подчеркнуть, что выход Y задает полное число космогенных нейтронов с энергиями больше нуля. Чтобы найти поток нейтронов с энергией выше некоторой фиксированной, нужно учитывать форму дифференциального энергетического спектра генерации нейтронов. Его форма для стандартного грунта практически не изменяется с глубиной. До энергий $T_n \sim 100$ МэВ спектр можно приближенно аппроксимировать законом dT_n/T_n , при больших энергиях — dT_n/T_n^2 .

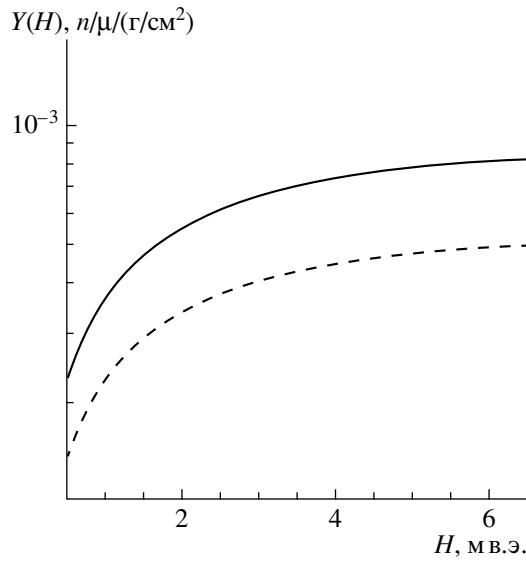


Рис. 3. Зависимость выхода нейтронов от глубины H в грунте. Кривые: сплошная — расчет с помощью UF ($A = 22$); штриховая — расчет [2] ($A = 27$).

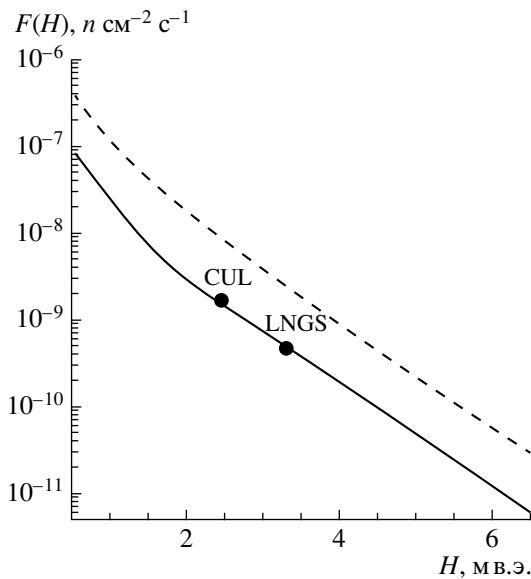


Рис. 4. Полный поток нейтронов от мюонов в грунте. Кривые: штриховая — расчет [28] ($\bar{A} = 23$), сплошная — расчет с помощью UF (стандартный грунт $A = 22$, настоящая работа). Точки — поток космогенных нейтронов в грунте подземных лабораторий Capriano (грунт CUL, расчет для 2450 м.в.э. — $1.73 \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [29]) и Gran Sasso (грунт LNGS, расчет для 3300 м.в.э. — $4.58 \times 10^{-10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ [30]).

3. ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ПОТОКА КОСМОГЕННЫХ НЕЙТРОНОВ В ГРУНТЕ

Низкофонные эксперименты требуют все более точного знания характеристик фона. Точность

выражения (1) для выхода Y в веществе с массовым числом A определяется погрешностью величин b_n , α , β и \bar{E}_μ . Как показано в работе [14], наибольшую ошибку вносит величина \bar{E}_μ , если она определяется по формулам, таким, как (2). Точность определения выхода незначительно улучшается от 17% до 15% в диапазоне \bar{E}_μ от 40 до 400 ГэВ. Погрешность выражения (6) относительно (1) увеличивается за счет ошибки в интенсивности I_μ и длине $\lambda = l_n \rho$. Точность определения λ для грунта около 14%. При определении I_μ с помощью функций, фитирующих экспериментальные данные (вариант такой функции (8) предложен в [28]), ошибка величины I_μ может достигать 15%. В этом случае погрешность определения потока нейтронов при известном химсоставе грунта составит $\sim 25\%$. Помимо указанных погрешностей, точность оценки потока космогенных нейтронов в конкретном грунте с помощью выражения (7) будет определяться отличием химсостава этого грунта от стандартного. От химсостава зависит, во-первых, величина выхода нейтронов (через множитель A^β в UF) и, во-вторых, длина релаксации нейтронов λ . Утяжеление грунта увеличивает как выход нейтронов, так и, незначительно, длину λ . Наиболее распространенные скальные породы имеют \bar{A} в интервале 20–25. Таким образом, применение выражения (7) для определения потока $F(h)$ при неизвестном составе грунта приводит к неопределенности около 30%. Точность оценки потока нейтронов можно повысить, устанавливая величины I_μ и \bar{E}_μ экспериментально, как это было сделано в работе [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выход космогенных нейтронов, а также их темп образования и поток в стандартном грунте в зависимости от глубины получены с помощью универсальной формулы для выхода нейтронов. Выражения (7), (8) позволяют при планировании эксперимента и анализе данных оценить поток космогенных нейтронов на границе “камера–грунт” с точностью около 30%. Кроме того, используя выражение (6), можно определить поток нейтронов, производимых мюонами в любом веществе, входящем в состав экспериментальной установки и ее защиты.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант № 15-02-01056_a), гранта НШ-3110.2014.2 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные свойства материи и астрофизика”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. G. K. Menon and P. V. Ramana Murthy, *Progress in Elementary Particles and Cosmic Ray Physics* (North-Holland, Amsterdam, 1967), Vol. 9, p. 161.
2. Г. Т. Зацепин, О. Г. Рязжская, Изв. АН СССР. Сер. физ. **29**, 1946 (1965).
3. О. Г. Ryažskaya and G. T. Zatsepin, in *Proceedings of International Conference Cosmic Rays, 1965*, Vol. 1, p. 987.
4. О. Г. Рязжская, Препринт № 18, ФИАН (Москва, 1966).
5. Л. Б. Безруков и др., ЯФ **17**, 98 (1973) [Sov. J. Nucl. Phys. **17**, 51 (1973)].
6. О. Г. Рязжская, Дис. ... д-ра физ.-мат. наук, ИЯИ РАН (Москва, 1986).
7. M. Aglietta *et al.*, Nuovo Cimento C **12**, 467 (1989).
8. Н. Ю. Агафонова и др. (LVD Коллаб.), Изв. РАН. Сер. физ. **69**, 400 (2005) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **69**, 459 (2005)].
9. Н. Ю. Агафонова и др. (LVD Коллаб.), Изв. РАН. Сер. физ. **75**, 437 (2011) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **75**, 408 (2011)].
10. F. F. Khalchukov *et al.*, Nuovo Cimento C **6**, 320 (1983).
11. O. G. Ryažhskaya, in *Proceedings of 20th ECRS'06, Lisbon, 2006*, <http://www.lip.pt/event/2006/ecrs/proc/>
12. А. С. Мальгин, О. Г. Рязжская, ЯФ **71**, 1800 (2008) [Phys. Atom. Nucl. **71**, 1769 (2008)].
13. Г. В. Горшков, В. А. Зябкин, ЯФ **12**, 340 (1970) [Sov. J. Nucl. Phys. **12**, 187 (1970)].
14. Н. Ю. Агафонова, А. С. Мальгин, ЯФ **76**, 650 (2013) [Phys. Atom. Nucl. **76**, 607 (2013)].
15. N. Yu. Agafonova and A. S. Malgin, Phys. Rev. D **87**, 113013 (2013).
16. G. Bellini *et al.* (Borexino Collab.), arXiv: 1304.7381.
17. L. Reichhart *et al.*, Astropart. Phys. **47**, 67 (2013), arXiv: 1302.4275.
18. Т. П. Аминева и др., *Исследование мюонов сверхвысоких энергий* (Наука, Москва, 1975).
19. D. E. Groom *et al.*, At. Data Nucl. Data Tables **78**, 183 (2001).
20. P. Lipari and T. Stanev, Phys. Rev. D **44**, 3543 (1991).
21. Г. В. Горшков, В. А. Зябкин, ЯФ **7**, 770 (1968) [Sov. J. Nucl. Phys. **7**, 470 (1968)].
22. Г. В. Горшков, В. А. Зябкин, Р. М. Яковлев, ЯФ **18**, 109 (1973) [Sov. J. Nucl. Phys. **18**, 57 (1973)].
23. L. Bergamasco, S. Costa, and P. Picchi, Nuovo Cimento A **13**, 403 (1973).
24. S. Abe *et al.*, Phys. Rev. C **81**, 025807 (2010).
25. M. Ambrosio *et al.* (MACRO Collab.), Astropart. Phys. **19**, 313 (2003), hep-ex/0207043v2.
26. А. П. Веселкин, Ю. А. Егоров, И. Я. Емельянов и др., *Спектры быстрых нейтронов за материалами и композициями защиты ядерных реакторов (атлас)* (Атомиздат, Москва, 1970).
27. Т. А. Гермогенова, С. Ф. Дегтярев, В. В. Орлов и др., *Перенос быстрых нейтронов в плоских защитах* (Атомиздат, Москва, 1971).
28. D.-M. Mei and A. Hime, Phys. Rev. D **73**, 053004 (2006).
29. J. M. Carmona *et al.*, hep-ex/0403009.
30. R. Persiani, PhD Thesis (University of Bologna, 2011).

THE CHARACTERISTICS OF MUON-INDUCED NEUTRONS IN STANDART ROCK

A. S. Malgin

The characteristics of the cosmogenic neutrons generated by muons in the standard rock such as yield, production rate, flux were determined. The dependences of the values on the depth of the standard rock and average muon energy were obtained. The given characteristics and dependences for standard rock allow simply to estimate a muon-induced neutron background in the underground laboratories at various chemical rock composition.