УДК 539.16 10.56564/27825264_2026_2_23

ВКЛАД КОСМИЧЕСКОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЕСТЕСТВЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ФОН НА ТЕРРИТОРИИ ЕКАТЕРИНБУРГА

К. А. Салдаев[1], А. А. Борноволоков[1], М. Д. Пышкина[2], А. А. Екидин[2], Е. И. Назаров[2], А. В. Васильев[2], М. Е. Васянович[2], О. Л. Ташлыков[1]

[1] Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия
[2] Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В Екатеринбурге проведены измерения скорости счета импульса космических нейтронов различных энергий в пяти локациях. Представлены результаты измерений в виде спектров нейтронов и вклада типов нейтронов в плотность потока и мощность амбиентного эквивалента дозы. Оценен вклад космического излучения в естественный радиационный фон на территории Екатеринбурга.

Ключевые слова: космические нейтроны; амбиентный эквивалент мощности дозы; Екатеринбург; дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М.

1. Введение

Человек постоянно подвергается облучению от естественных и искусственных источников, которое нарушает биохимические реакции и повреждает клетки организма. В состав естественного излучения входит космическое, сочетающее в себе компоненты галактического и солнечного излучений. Солнечное излучение почти полностью поглощается атмосферой Земли, поэтому на уровне моря его вклад невелик. Первичное галактическое излучение, обладающее большим диапазоном энергий частиц, от 10^2 до 10^{14} МэВ, и большой плотностью потока, также частично поглощается в атмосфере Земли, рождая вторичное нейтронное излучение.

Вклад в облучение населения от вторичного нейтронного излучения на уровне моря может достигать 10 % [1], в то время как на высоте 2 650 м – 60 % [2, 3].

Город Екатеринбург был основан в 1723 г. Расположен на восточном склоне Среднего Урала, по берегам реки Исети (бассейн Иртыша), в ее верхнем течении. Находится на границе Европы и Азии, в срединной части Уральского хребта. Географические координаты: 56°50′ северной широты, 60°35′ восточной долготы, высота над уровнем моря – 270 м. Преимущественно высота над уровнем моря в пределах Екатеринбурга варьируется от 220 до 280 м [4]. Некоторые локации города расположены на возвышенностях относительно основной территории и могут достигать 400 м (гора Пшеничная, гора Татищева).

Цель работы – оценить вклад космического нейтронного излучения в облучение населения на территории Екатеринбурга естественным радиационным фоном.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Выбрать локации для проведения измерений.
2. Провести измерения скорости счета нейтронного излучения.
3. Восстановить энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения.
4. Оценить суммарную плотность потока и мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения.
5. Оценить вклад нейтронов различных энергий в суммарную плотность потока и мощность амбиентного эквивалента дозы.
6. Оценить вклад космического нейтронного излучения в облучение населения на территории Екатеринбурга естественным радиационным фоном.

2. Материалы и методы

Для оценки вклада нейтронного космического излучения в общую дозу облучения населения Екатеринбурга был проведен комплекс исследований. Были выбраны 5 локаций, отличающиеся географически и высотами относительно уровня моря (табл. 1). Наглядное расположение локаций измерений на карте города представлено на рис. 1.

Таблица 1. Локации для измерения скорости счета импульсов нейтронного излучения

Локация	Высота над уровнем моря точки измерения, м	Дата проведения измерений
Ул. Софьи Ковалевской, 20 (крыша ИПЭ УрО РАН)	286	14.09.2020 – 30.09.2020
Ул. Владимира Высоцкого, 4/1 (балкон 7-го этажа)	292	19.06.2020 – 27.06.2020
Ул. Блюхера, 55 (подвал)	296	24.11.2020 – 22.01.2021
Ул. Блюхера, 55 (крыша 7-го этажа)	314	04.11.2020 – 20.11.2020
Ул. Бакинских комиссаров, 2а (на среднем балконе Белой башни[1])	319	17.08.2020 – 30.08.2020

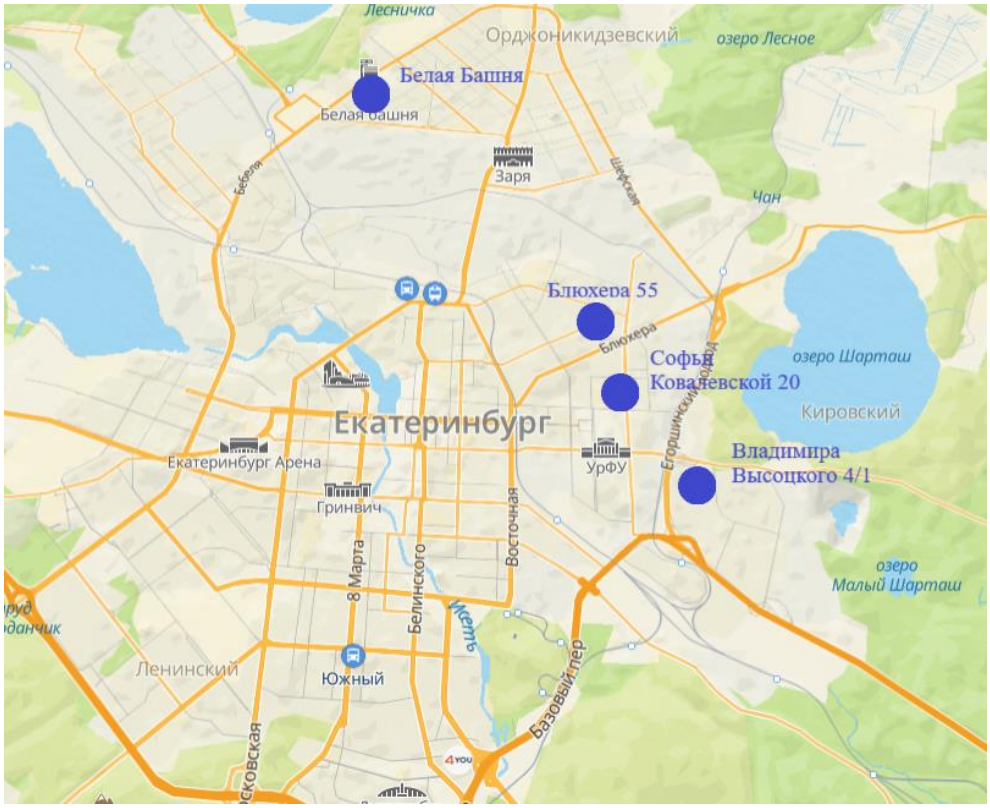

Рис. 1. Локации Екатеринбурга, в которых проводились измерения нейтронного потока

На локациях были проведены измерения скорости счета импульсов нейтронного излучения в период с 19.06.2020 по 22.01.2021 для каждой сферы-замедлителя (на ул. Блюхера, 55 измерения проводились на двух высотах над уровнем моря).

Измерения скорости счета импульсов нейтронного излучения проводились с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором из 12 полиэтиленовых сфер-замедлителей (рис. 2) диаметром 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 7; 8; 9; 9,5; 10; 12 дюймов.

[1] Белая башня (бывшая водонапорная башня УЗТМ) – памятник архитектуры конструктивизма в Орджоникидзевском районе Екатеринбурга.

Рис. 2. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором из 12 полиэтиленовых сфер-замедлителей [5]

Пример размещения дозиметра-радиометра на локации приведен на рис. 3.

Рис. 3. Измерение скорости счета импульсов с помощью МКС-АТ1117М со сферой-замедлителем на ул. Бакинских комиссаров, 2а (Белая башня)

В качестве детектора в дозиметре-радиометре использовали гелиевый счетчик Гелий-25/90-10,0/ОЦ, который последовательно располагали в каждой сфере-замедлителе. Сферы-замедлители позволяют регистрировать нейтроны в широком диапазоне энергий – от 0,025 эВ до 16 МэВ [6, 7].

Полученные скорости счета импульсов были использованы для восстановления спектра нейтронного излучения с помощью алгоритма FRUIT 6 [8, 9] по аттестованной методике (ФР.1.38.2020.37361). Алгоритм основан на вычислении минимума невязки путем варьирования свободных переменных, описывающих функции спектров тепловых ($1\cdot10^{-9}$ – $5\cdot10^{-8}$ МэВ), промежуточных ($1\cdot10^{-7}$ – $3{,}16\cdot10^{-2}$ МэВ) и быстрых нейтронов ($5\cdot10^{-2}$ – $1{,}6\cdot10^{1}$ МэВ). Для оценки неопределенности значения плотности потока нейтронного излучения в энергетическом диапазоне были рассчитаны 10 повторностей, полученных путем варьирования случайным образом скорости счета импульсов в пределах погрешности измерений (20 %). Энергетические зависимости

чувствительности детектора в сферах-замедлителях различного диаметра были получены методом Монте-Карло в программе FLUKA [10, 11].

3. Результаты

Восстановленные энергетические распределения плотности потока нейтронного излучения на локациях представлены на рис. 4–8.

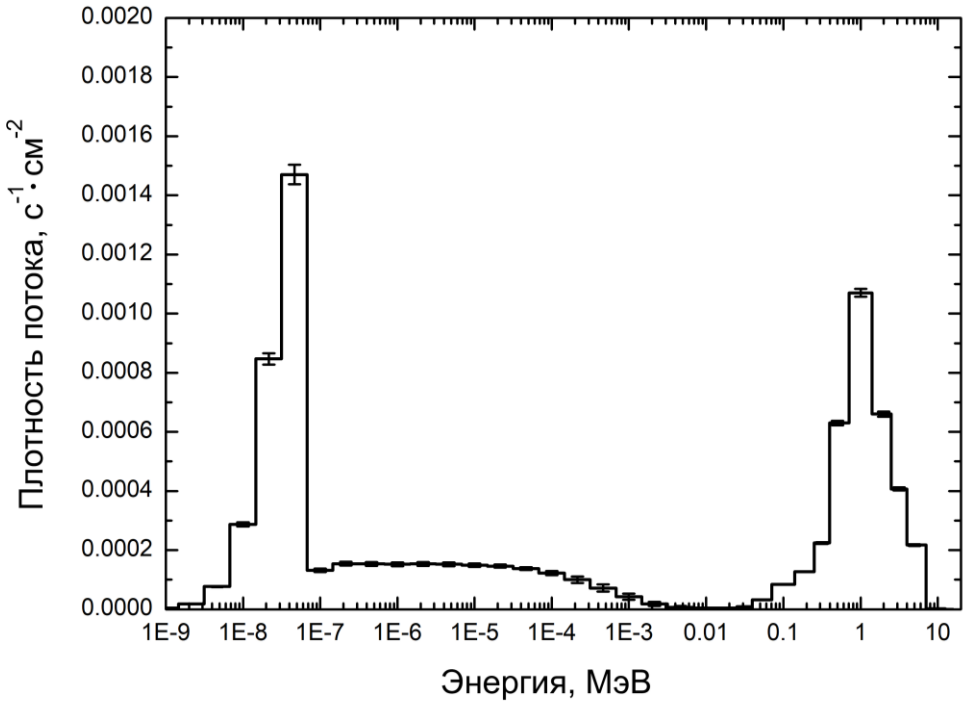

Рис. 4. Энергетические распределения плотности потока нейтронного излучения на локации – ул. Софьи Ковалевской, 20 (крыша ИПЭ УрО РАН)

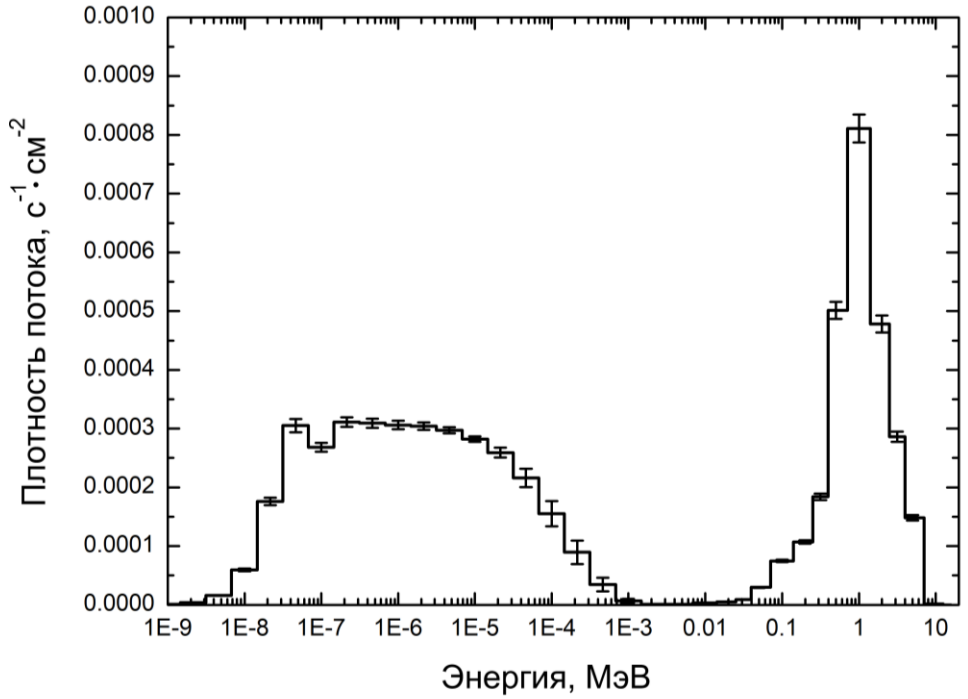

Рис. 5. Энергетические распределения плотности потока нейтронного излучения на локации – ул. Владимира Высоцкого, 4/1 (балкон 7-го этажа)

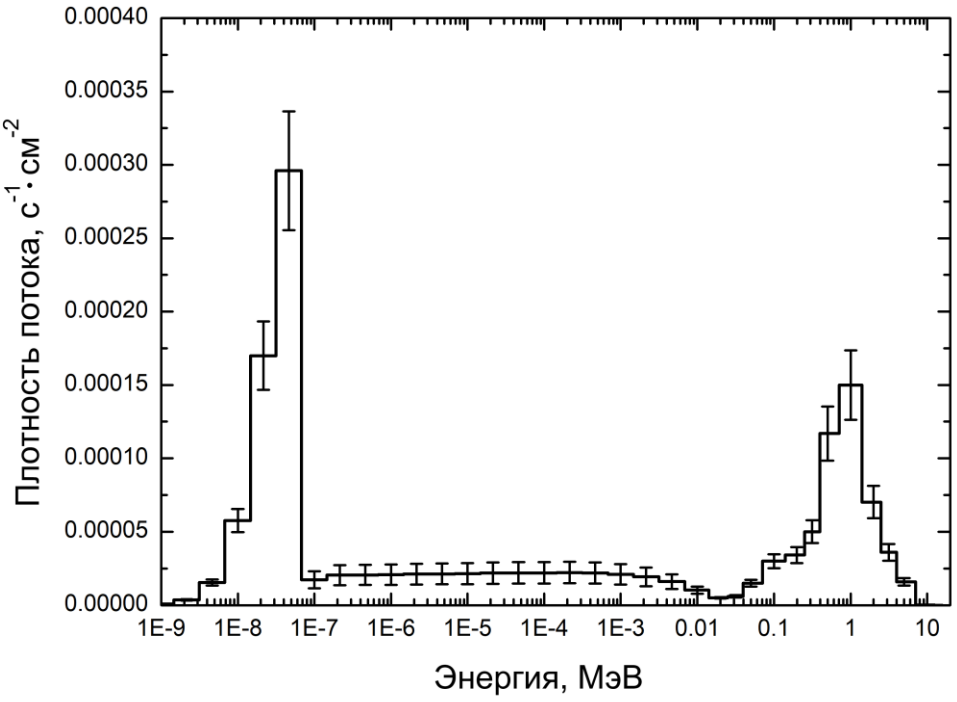

Рис. 6. Энергетические распределения плотности потока нейтронного излучения на локации – ул. Блюхера, 55 (подвал)

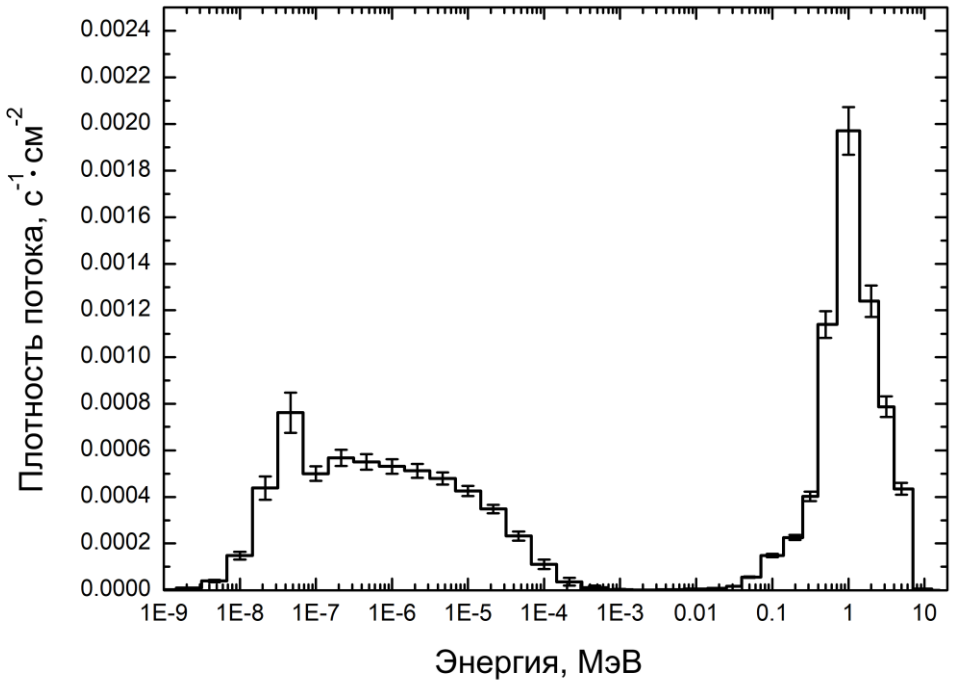

Рис. 7. Энергетические распределения плотности потока нейтронного излучения на локации – ул. Блюхера, 55 (крыша 7-го этажа)

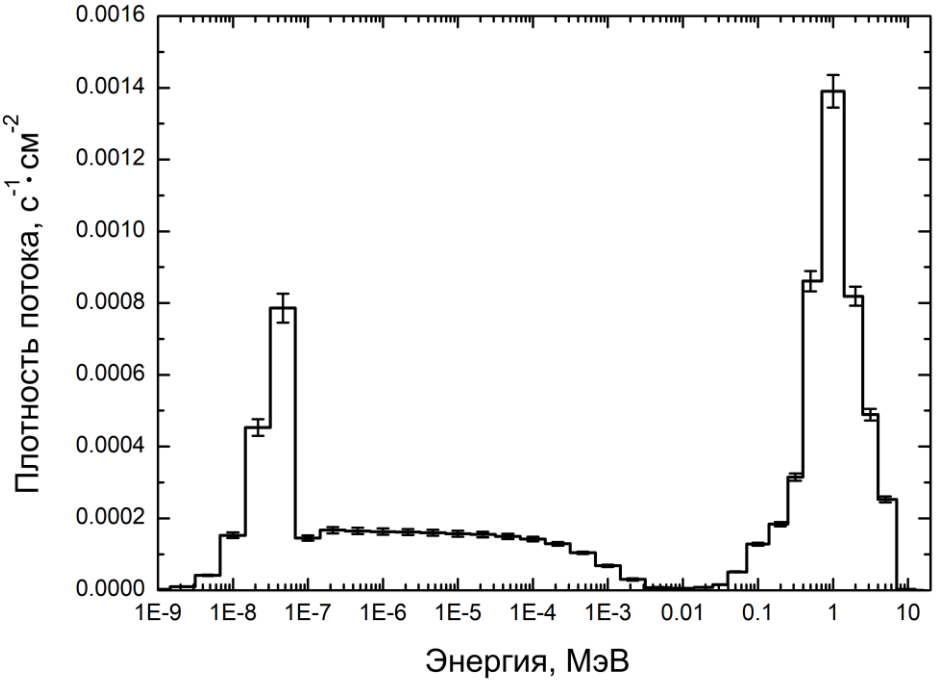

Рис. 8. Энергетические распределения плотности потока нейтронного излучения на локации – ул. Бакинских комиссаров, 2а (на среднем балконе Белой башни)

По результатам восстановления энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения оценены вклады тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов в плотность потока и в мощность амбиентного эквивалента дозы (табл. 2).

Мощность амбиентного эквивалента дозы определяется согласно [12]:

$$\dot{H}^*(10) = \int_0^\infty h^*(10,E) \cdot \Phi_E(E) dE, \quad (1)$$

где $h^*(10,E)$ – удельный амбиентный эквивалент дозы в зависимости от энергии нейтронного излучения.

Таблица 2. Вклад нейтронов различных энергетических групп в плотность потока и в мощность амбиентного эквивалента дозы

Локация	Энергетическая группа нейтронов	Плотность потока	Вклад	Мощность амбиентного эквивалента дозы	Вклад
		см$^{-2}$ · с$^{-1}$	%	мкЗв/ч	%
Ул. Софьи Ковалевской, 20 (ИПЭ УрО РАН)	Тепловые	2,7 · 10^{-3}	34	1,12 · 10^{-4}	2
	Промежуточные	2,17 · 10^{-3}	28	4,00 · 10^{-4}	8
	Быстрые	2,99 · 10^{-3}	38	4,32 · 10^{-3}	90
Ул. Владимира Высоцкого, 4/1	Тепловые	5,61 · 10^{-4}	9	2,33 · 10^{-5}	0,6
	Промежуточные	3,25 · 10^{-3}	54	3,97 · 10^{-4}	11,0
	Быстрые	2,23 · 10^{-3}	37	3,21 · 10^{-3}	88,4
Ул. Блюхера, 55 (подвал)	Тепловые	5,44 · 10^{-4}	39	2,26 · 10^{-5}	3
	Промежуточные	4,59 · 10^{-4}	33	9,61 · 10^{-5}	14
	Быстрые	3,9 · 10^{-4}	28	5,56 · 10^{-4}	83

Окончание табл. 2

Ул. Блюхера, 55 (крыша)	Тепловые	$1,4 \cdot 10^{-3}$	12	$5,80 \cdot 10^{-5}$	0,7
	Промежуточные	$5,17 \cdot 10^{-3}$	42	$7,80 \cdot 10^{-4}$	8,8
	Быстрые	$5,58 \cdot 10^{-3}$	46	$8,10 \cdot 10^{-3}$	90,5
Ул. Бакинских Комиссаров, 2а (Белая башня)	Тепловые	$1,44 \cdot 10^{-3}$	18	$6,01 \cdot 10^{-5}$	1
	Промежуточные	$2,61 \cdot 10^{-3}$	33	$5,53 \cdot 10^{-4}$	9
	Быстрые	$3,82 \cdot 10^{-3}$	49	$5,51 \cdot 10^{-3}$	90

4. Обсуждение

Измеренные спектры космического нейтронного излучения имеют похожую форму, но различаются по величине интегральной плотности потока. В потоке наблюдается преобладание быстрых (от 28 до 49 %) и промежуточных (от 28 до 54 %) нейтронов. Вклад быстрых нейтронов в мощность амбиентного эквивалента дозы составляет от 83 до 90,5 %. Не оценивался вклад сверхбыстрых нейтронов ввиду технических ограничений прибора и применяемых методик. По результатам работ [1–3] энергии нейтронного излучения достигают десятков гигаэлектронвольт. Вклад нейтронов в диапазоне от 20 МэВ в плотность потока оценивается на уровне 24 % по работе [1]. Несмотря на отсутствие оценки сверхбыстрых нейтронов, качественно и количественно энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения на территории Екатеринбурга соответствует результатам работ [1–3].

Все измерения, за исключением подвала на ул. Блюхера, были проведены под открытым небом, но даже так заметны явные различия во вкладе нейтронов различных спектров как в мощность амбиентного эквивалента дозы, так и в плотность потока, что говорит о неоднородности нейтронного излучения. На измерениях, зарегистрированных в подвале дома на улице Блюхера, можно заметить минимумы в плотности потока и в мощности амбиентного эквивалента дозы, связано это с толстым слоем строительных материалов из железобетона, который поглотил, отразил или замедлил часть нейтронов, попадающих в подвал здания.

Среднее территориальное распределение значений мощности амбиентного эквивалентна дозы в Екатеринбурге составляет от 0,07 до 0,23 мкЗв/ч. Вклад нейтронного излучения в общую мощность дозы составляет от 2,1 до 6,9 %. Оцененная мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения на территории Екатеринбурга составляет порядка $4,84 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч, или 0,042 мЗв/год.

5. Выводы

В рамках работы выбраны локации на территории Екатеринбурга для оценки дозы облучения населения вторичным космическим излучением. Проведены измерения скорости счета нейтронного излучения с применением дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором сфер-замедлителей различного диаметра. Проведено восстановление энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. Суммарная плотность потока на локациях 1, 2 и 4, 5 (за исключением измерений, проведенных в подвале здания) варьируется в диапазоне от $6 \cdot 10^{-3}$ до $12 \cdot 10^{-3}$ нейтр./(с·см^2). Суммарная плотность потока измеренная в подвале здания (локация 3) составила $1,4 \cdot 10^{-3}$ нейтр./(с·см^2). Мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения на локациях 1, 2 и 4, 5 (за исключением измерений, проведенных в подвале здания) варьируется в диапазоне от $3,6 \cdot 10^{-3}$ до $8,9 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч. Мощность амбиентного эквивалента дозы нейтронного излучения, измеренная в подвале здания (локация 3), составила $0,7 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч. В плотности потока нейтронного излучения наблюдается преобладание быстрых (от 28 до 49 %) и промежуточных (от 28 до 54 %) нейтронов. Вклад быстрых нейтронов в мощность амбиентного эквивалента дозы составляет от

83 до 90,5 %. Космические нейтроны среднетерриториально составляют от 2,1 до 6,9 % мощности амбиентного эквивалентна дозы в Екатеринбурге, или же 4,2 % от годовой нормы в 1 мЗв/год.

6. Благодарности

Коллектив авторов благодарит Арх-группу PODELNIKI за помощь в проведении измерений на территории памятника архитектуры конструктивизма – Белой башне.

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

7. Список литературы

1. *Nakamura, T.* Cosmic-ray Neutron Spectrometry and Dosimetry / T. Nakamura // Journal of Nuclear Science and Technology. 45:sup5, 1–7. – DOI: 10.1080/00223131.2008.10875772.
2. Continuous measurement of secondary neutrons from cosmic radiation at mountain altitudes and close to the North Pole – a discussion in terms of H*(10) / W. Rühm, V. Mares, C. Pioch [et al.] // Radiat. Prot. Dosim., 136(4), 256–261. – Doi:10.1093/rpd/ncp161.
3. *Chen, J.* Significant impact on effective doses received during commercial flights calculated using the new ICRP radia tion weighting factors / J. Chen, V. Mares // Health Phys., 98(1), 74–76. – Doi:10.1097/HP. 0b013e3181bada5a.
4. *Литовский, В. В.* Пространственное развитие Большого Екатеринбурга и его лимитирующие факторы по высотности / В. В. Литовский // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2020. – № 3(46). – С. 1–5. – DOI: 10.25628/UNIIP.2020.46.3.003.
5. МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором из 12 полиэтиленовых сфер-замедлителей / М. Д. Пышкина, А. В. Васильев, А. А. Екидин, Е. И. Назаров ; Институт промышленной экологии УрО РАН (ИПЭ УрО РАН). – Екатеринбург, 2024. – URL: https://iie.uran.ru/cont/images/3209.png (дата обращения: 03.12.2024).
6. *Пышкина, М. Д.* Совершенствование системы индивидуального дозиметрического контроля нейтронного излучения на объектах использования атомной энергии : специальность 2.4.9. «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пышкина Мария Дмитриевна ; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2022. – 154 с.
7. Development and testing of a neutron radiation spectrometer in fields of radionuclide sources / M. D. Pyshkina, A. V. Vasilyev, A. A. Ekidin, M. V. Zhukovsky // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Т. 2163, 070003.
8. FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces / R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernández // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2007. – Vol. 580. – P. 1301–1309.
9. *Pyshkina, M.* Neutron spectrum reconstruction for purposes of personnel dosimetry: Modelling study / M. Pyshkina, A. Vasilyev, A. Ekidin // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2343. 040011.
10. The Fluka Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications / T. T. Bohlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin [et al.] // Nuclear Data Sheets. – 2014. – Vol. 120. – P. 211–214.
11. Fluka: a multi-particle transport code / A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso, J. Ranft. – Geneva : CERN, 2005. – 387 p.
12. ISO 8529. Reference neutron radiations : International standard / ISO. – Switzerland : International Standard Organization, 2001. – 24 p.

Сведения об авторах:

Салдаев Кирилл Андреевич, студент УрФУ, специальность 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», 3 курс, группа ЭН-330019, г. Екатеринбург, Россия. Эл. почта: i.saldaew@mail.ru

Борноволоков Александр Андреевич, студент УрФУ, специальность 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», 3 курс, группа ЭН-330019, г. Екатеринбург, Россия.

Пышкина Мария Дмитриевна, к. т. н., н. с. радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Екидин Алексей Акимович, к. физ.-мат. н., в. н. с. радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН, Института Промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Назаров Евгений Игоревич, к. т. н., заведующий радиационной лабораторией Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Васильев Алексей Владимирович, к. т. н., с. н. с. лаборатории урбанизированной среды Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Васянович Максим Евгеньевич, к. ф.-м. н., н. с. Радиационной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Ташлыков Олег Леонидович, д. т. н., профессор кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии УрФУ, г. Екатеринбург, Россия.

CONTRIBUTION OF COSMIC NEUTRON RADIATION TO THE NATURAL RADIATION BACKGROUND IN YEKATERINBURG

K. A. Saldaev[1], A. A. Bornovolokov[1], M. D. Pyshkina[2], A. A. Ekidin[2], E. I. Nazarov[2], A. V. Vasilyev[2], M. E. Vasyanovich[2], O. L. Tashlykov[1]

[1]Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia
[2] Institute of Industrial Ecology UB RAS, Yekaterinburg, Russia

In the city of Yekaterinburg, measurements of the count rate of cosmic-ray neutrons of various energies were carried out at 5 locations. The measurement results are presented in the form of neutron spectra and a table. The contribution of cosmic radiation to the natural radiation background of the Yekaterinburg territory has been estimated.

Key words: cosmic neutrons; ambient dose rate equivalent; Yekaterinburg; AT1117M.

References

1. *Nakamura, T.* Cosmic-ray Neutron Spectrometry and Dosimetry / T. Nakamura // Journal of Nuclear Science and Technology. 45:sup5, 1–7. – DOI: 10.1080/00223131.2008.10875772.
2. Continuous measurement of secondary neutrons from cosmic radiation at mountain altitudes and close to the North Pole – a discussion in terms of H*(10) / W. Rühm, V. Mares, C. Pioch [et al.] // Radiat. Prot. Dosim., 136(4), 256–261. – Doi:10.1093/rpd/ncp161.
3. *Chen, J.* Significant impact on effective doses received during commercial flights calculated using the new ICRP radia tion weighting factors / J. Chen, V. Mares // Health Phys., 98(1), 74–76. – Doi:10.1097/HP. 0b013e3181bada5a.
4. *Litovskiy, V. V.* Prostranstvennoye razvitiye Bol'shogo Yekaterinburga i yego limitiruyushchiye faktory po vysotnosti. Spatial development of Greater Yekaterinburg and its limiting factors on height // Akademicheskiy vestnik UralNIIproyekt RAASN. – 2020. – №. 3(46). – P. 1–5. – DOI: 10.25628/UNIIP.2020.46.3.003.
5. MKS-AT1117M s blokom detektirovaniya BDKN-06 i naborom iz 12 polietilenovykh sfer-zamedliteley / M. D. Pyshkina, A. V. Vasilyev, A. A. Ekidin, E. I. Nazarov [MKS-AT1117M with BDKN-06 detection unit and set of 12 polyethylene moderator spheres]. Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IIE UB RAS), Yekaterinburg. Retrieved December 3, 2024, from https://iie.uran.ru/cont/images/3209.png
6. *Pyshkina, M. D.* Sovershenstvovaniye sistemy individual'nogo dozimetricheskogo kontrolya neytronnogo izlucheniya na ob"yektakh ispol'zovaniya atomnoy energii [Improvement of the system of individual dosimetric control of neutron radiation at nuclear facilities] (Doctoral dissertation). Ural Federal University, Yekaterinburg, 2022Russia. – 154 p.
7. Development and testing of a neutron radiation spectrometer in fields of radionuclide sources / M. D. Pyshkina, A. V. Vasilyev, A. A. Ekidin, M. V. Zhukovsky // AIP Conference Proceedings. – 2019. – T. 2163, 070003.
8. FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces / R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernández // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2007. – Vol. 580. – P. 1301–1309.
9. *Pyshkina, M.* Neutron spectrum reconstruction for purposes of personnel dosimetry: Modelling study / M. Pyshkina, A. Vasilyev, A. Ekidin // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2343. 040011.
10. The Fluka Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications / T. T. Bohlen, F. Cerutti, M. P. W. Chin [et al.] // Nuclear Data Sheets. – 2014. – Vol. 120. – P. 211–214.
11. Fluka: a multi-particle transport code / A. Ferrari, P. R. Sala, A. Fasso, J. Ranft. – Geneva : CERN, 2005. – 387 p.
12. ISO 8529. Reference neutron radiations : International standard / ISO. – Switzerland : International Standard Organization, 2001. – 24 p.