

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО ЗАПОВЕДНИКА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ CARI-7

С. М. Молчанов^{1,2}, Д. Д. Десятов²

¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России, г. Екатеринбург, Россия

² Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В статье представлены результаты работы по оценке мощности эффективной дозы (МЭД), обусловленной космическим излучением, на территории Восточно-Уральского государственного заповедника с помощью программного обеспечения CARI-7. Показан диапазон изменения МЭД космического излучения от 32,00 до 39,67 нЗв/ч за период с 2022 по 2025 г. включительно. Средняя МЭД космического излучения в этот период – 35,71 нЗв/ч. Был рассчитан вклад отдельных видов космического излучения в суммарную МЭД. Наибольший вклад в МЭД обусловлен нейтронами – 42,53 %. Среднее значение МЭД космического излучения с момента аварии на химкомбинате «Маяк» до 2025 г. на территории Восточно-Уральского заповедника – 34,75 нЗв/ч.

Ключевые слова: космическое излучение; Восточно-Уральский государственный заповедник; гамма-излучение; нейтронное излучение; мощность дозы; CARI-7.

1. Введение

Термин «космическое излучение», или «космические лучи» (англ. *cosmic rays*), впервые был предложен американским физиком и нобелевским лауреатом Робертом Милликеном в 1926 г. [1]. Милликен считал, что оно состоит только из гамма-излучения, что было ошибочным. Дальнейшее изучение космического излучения в XX в. показало, что оно содержит также заряженные частицы.

Космические лучи условно делятся на [2]:

- первичные космические лучи: галактические частицы, которые проникают в Солнечную систему и могут столкнуться с Землей;
- солнечные космические лучи: частицы, возникающие на Солнце (иногда их относят к первичным космическим лучам);
- вторичные космические лучи: частицы, образующиеся в атмосфере Земли, когда первичные космические лучи сталкиваются с атмосферными атомами, создавая ливни вторичных частиц (их называют каскадными частицами);
- наземные космические лучи: частицы, которые в конечном итоге сталкиваются с Землей (менее 1 % из них – первичные частицы, в основном это каскадные частицы, начиная с третьего и заканчивая седьмым поколением).

Первичные космические лучи (включая солнечные космические лучи) в основном состоят из протонов (92 %), α -частиц (6 %), а также из более тяжелых ядер, электронов e^- и позитронов e^+ [3].

При взаимодействии первичных космических лучей с атмосферными ядрами возникает три компонента [4]:

- электромагнитный «мягкий» компонент (гамма-излучение, возникающее в результате распада пионов π^0 , а также при торможении заряженных частиц; электроны e^- и позитроны e^+ , возникающие в результате распада мюонов μ^+ , μ^- , а также в паре при взаимодействии гамма-излучения с атмосферой);
- мезонный «жесткий» компонент (мюоны μ^+ , μ^- , возникающие в результате распада пионов π^+ , π^-);

– адронный компонент (нуклоны – нейтроны n^0 и протоны p^+ ; мезоны – пионы π^+ , π^- и каоны K^+ , K^-).

Субатомные частицы из каскада также могут вызывать ядерные реакции, например, реакции скалывания или нейтронного захвата [4]. Новые ядра, образованные при взаимодействии первичных или вторичных частиц космических лучей с атмосферными, называются космогенными нуклидами. Космогенные нуклиды могут быть стабильными (например, ^6Li , ^7Li , ^9Be , ^{10}B , ^{11}B) и радиоактивными (^3H [5], ^{14}C [6], ^{32}P , изотопы Cl , I , Ne и т. д.).

Спектр первичного космического излучения имеет широкий энергетический диапазон – от 10^6 до единиц 10^{20} эВ [4], однако вблизи Земли основную часть потока составляют солнечные частицы с энергиями единиц мегаэлектронвольт (МэВ) (исключение составляют солнечные частицы, генерирующиеся на Солнце или вблизи него во время солнечных вспышек и корональных выбросов масс, – их энергия достигает десятков гигаэлектронвольт (ГэВ) [7]). В целом частицам нужна очень высокая энергия, чтобы создать каскад, который может проникнуть до уровня моря, – не менее 1 ГэВ, за исключением частиц с траекторией, направленной прямо вниз, в один из магнитных полюсов Земли [2]. Поток солнечного излучения главным образом зависит от 11-летнего солнечного цикла, высоты над уровнем моря и геомагнитных координат [8]. На рис. 1. представлен график солнечного цикла, отображающий динамику активности Солнца в период с 2005 по 2025 г., а также прогноз до 2030 г., по данным открытой платформы SpaceWeatherLive [9].

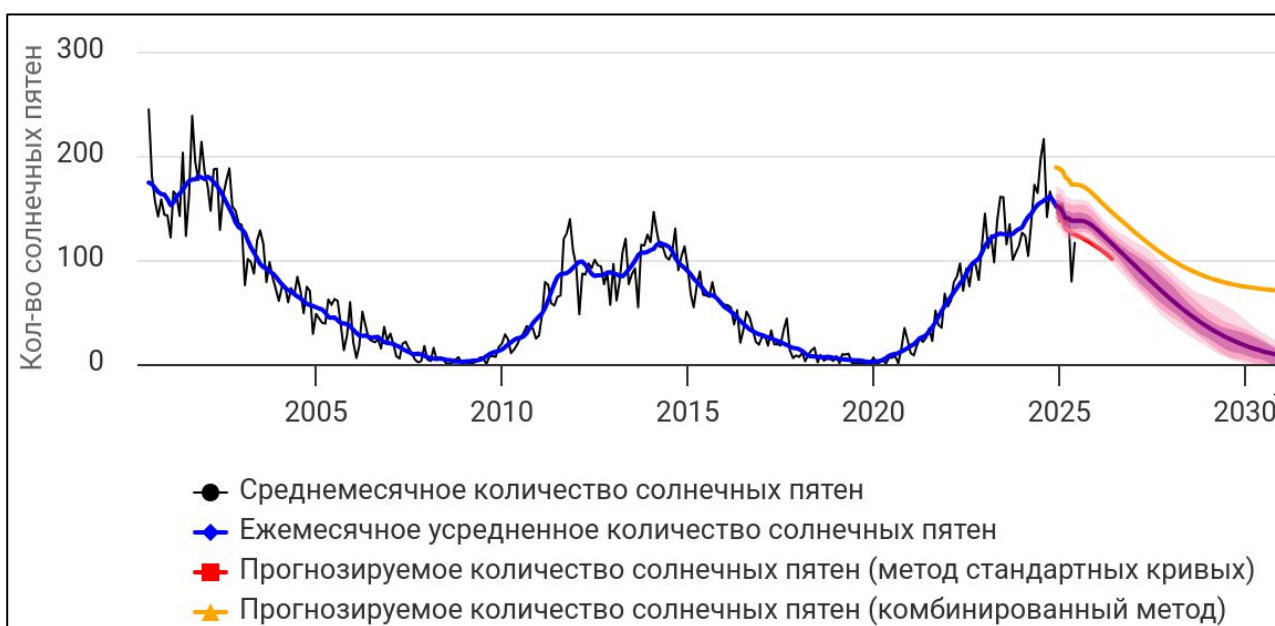


Рис. 1. Динамика активности Солнца (количество солнечных пятен) в период с 2005 по 2025 г., а также прогноз до 2030 г. [9]

Непосредственное измерение мощности дозы, создаваемой космическим излучением, сопряжено с огромными временными затратами и ресурсами [10], однако МЭД дозы может быть рассчитана с использованием аналитических моделей, реализованных в программных средствах [11, 12]. Измерение мощности дозы природного излучения может быть реализовано инструментально. Результаты измерений будут зависеть от пространственного распределения природных радионуклидов, которое определяется местными геологическими особенностями [13, 14]. Аттестованные средства измерения, позволяющие в полевых условиях выполнять гамма-спектрометрические исследования поверхностной и удельной активности радионуклидов, открывают возможность для формирования модели, связывающей два измеряемых параметра – мощность дозы и значение поверхностной или удельной активности исследуемого радионуклида [15–18]. На

достоверность такой модели будут влиять факторы, формирующие отклик детектора наряду с излучением исследуемого радионуклида. В число таких факторов входят: собственный фон средств измерения (СИ); другие гамма-излучающие радионуклиды, например, природные; космическое излучение. В случае спектрометрических исследований вклад других радионуклидов в мощность дозы можно оценить по результатам измерения их удельной активности. Для оценки собственного фона СИ требуются отдельные исследования. Оценка вклада космического излучения может быть получена расчетным методом.

Данная статья – продолжение цикла работ, посвященных оценке радиационной обстановки на территории Восточно-Уральского государственного заповедника (далее – заповедника) – головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) [18]. Цель работы – оценить МЭД космического излучения на территории заповедника. Результаты исследования позволят в перспективе учитывать космическое излучение для оценки радиационной обстановки на данной территории.

2. Материалы и методы

Оценка МЭД космического излучения выполнена с помощью программы CARI-7. Данный компьютерный код используется для оценки галактического космического излучения на членов экипажа самолетов во время перелетов [3, 19]. Для моделирования излучения используется база данных (долговременная солнечная активность, кратковременные отклонения солнечной активности от среднемесячного значения, эффекты геомагнитных бурь), полученная на основе симуляции атмосферного излучения методом Монте-Карло с использованием программы MCNPX (программа, позволяющая моделировать прохождение различных частиц через атмосферу). CARI-7 также учитывает влияние солнечной активности и геомагнитного поля на уровень галактического космического излучения на выбранную пользователем дату. Программа позволяет рассчитать мощность AMBIENTной дозы, мощность эффективной и поглощенной дозы в конкретной географической точке с указанием даты и времени.

Для проведения расчетов был сформирован файл с исходными данными, взятыми из работы [18] (коды точек, координаты, дата, время, высота над уровнем моря), включая исследуемые составляющие космического излучения и требуемые дозиметрические величины.

Объект исследования

Восточно-Уральский государственный заповедник расположен в лесостепной зоне на территории Каслинского и Кунашакского районов Челябинской области, его площадь составляет 14 750 га [18], образован в 1966 г. спустя 9 лет после аварии на химкомбинате «Маяк». На рис. 2 изображена территория заповедника [20].

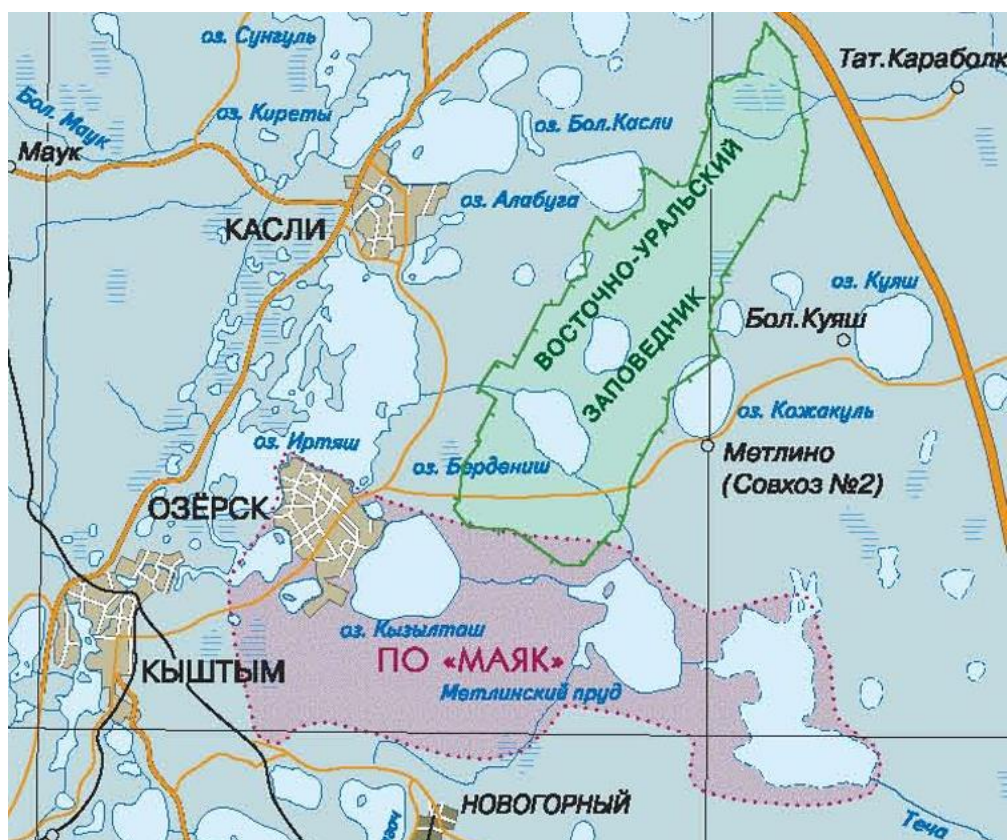


Рис. 2. Территория Восточно-Уральского заповедника [20]

3. Результаты

В работе [18] (табл. 2.3 и 3.1) представлены исходные параметры для программы, позволяющие производить расчеты в заданных координатах: 50 точек, расположенных вдоль границы заповедника, остальные 120 точек распределены по всей исследуемой территории, исключая озера, болота и другие водоемы, а также непроходимые места. Минимальная наблюдаемая высота – 212 м, максимальная – 273 м. Разница между максимальной и минимальной высотой составила 61 м.

В табл. 1 представлены результаты расчета, выполненные с помощью программы CARI-7 от источников космического излучения, составляющих вклад не менее 99 % в суммарную МЭД. Для того чтобы привязать полученные результаты к исследуемым точкам, использовались их коды [18, табл. 3.1].

Таблица 1. Результаты расчета МЭД, нЗв/ч

Код точки	Суммарное	Нейтроны	Фотоны	Электронны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_2	36,96	16,44	2,86	1,73	0,76	6,48	6,47	2,14
PR3L_3	36,91	16,42	2,86	1,73	0,76	6,47	6,46	2,14
PR3L_4	37,17	16,53	2,88	1,74	0,77	6,52	6,50	2,15
PR3L_5	37,41	16,64	2,90	1,76	0,77	6,56	6,55	2,16
PR3L_6	37,38	16,62	2,90	1,75	0,77	6,56	6,54	2,16
PR3L_7	37,38	16,62	2,90	1,75	0,77	6,56	6,54	2,16
PR3L_8	37,30	16,59	2,89	1,75	0,77	6,54	6,53	2,16
PR3L_9	35,26	15,18	2,80	1,70	0,75	6,38	6,37	2,02
PR3L_10	34,86	15,01	2,76	1,68	0,74	6,31	6,29	1,99
PR3L_11	34,85	15,01	2,76	1,68	0,74	6,31	6,29	1,99
PR3L_12	34,73	14,95	2,76	1,68	0,74	6,28	6,27	1,99
PR3L_13	34,63	14,91	2,75	1,67	0,74	6,27	6,25	1,98
PR3L_14	35,02	15,08	2,78	1,69	0,74	6,34	6,32	2,00
PR3L_15	35,06	15,09	2,78	1,69	0,75	6,34	6,33	2,01

Продолжение табл. 1

Код точки	Суммарное	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_16	34,63	14,91	2,75	1,67	0,74	6,26	6,25	1,98
PR3L_17	34,85	15,00	2,76	1,68	0,74	6,31	6,29	1,99
PR3L_18	34,59	14,89	2,74	1,67	0,74	6,26	6,24	1,98
PR3L_19	34,50	14,85	2,74	1,66	0,73	6,24	6,23	1,97
PR3L_20	34,62	14,90	2,75	1,67	0,74	6,26	6,25	1,98
PR3L_21	34,77	14,97	2,76	1,68	0,74	6,29	6,28	1,99
PR3L_22	35,09	15,10	2,78	1,69	0,75	6,35	6,33	2,01
PR3L_23	35,00	15,07	2,78	1,69	0,74	6,33	6,32	2,00
PR3L_24	35,02	15,07	2,78	1,69	0,74	6,34	6,32	2,00
PR3L_25	34,97	15,06	2,77	1,69	0,74	6,33	6,31	2,00
PR3L_26	34,91	15,03	2,77	1,68	0,74	6,32	6,30	2,00
PR3L_27	34,95	15,05	2,77	1,69	0,74	6,32	6,31	2,00
PR3L_28	34,87	15,01	2,77	1,68	0,74	6,31	6,29	2,00
PR3L_29	35,12	15,12	2,79	1,70	0,75	6,35	6,34	2,01
PR3L_30	34,87	15,01	2,77	1,68	0,74	6,31	6,29	2,00
PR3L_31	35,01	14,92	2,80	1,70	0,75	6,39	6,38	2,00
PR3L_32	34,83	14,84	2,78	1,70	0,75	6,36	6,35	1,99
PR3L_33	34,54	14,72	2,76	1,68	0,74	6,31	6,29	1,97
PR3L_34	34,61	14,75	2,77	1,68	0,74	6,32	6,31	1,97
PR3L_35	34,65	14,77	2,77	1,69	0,74	6,33	6,31	1,98
PR3L_36	34,91	14,87	2,79	1,70	0,75	6,38	6,36	1,99
PR3L_37	35,05	14,93	2,80	1,71	0,75	6,40	6,39	2,00
PR3L_38	34,95	14,89	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	1,99
PR3L_39	35,16	14,98	2,81	1,71	0,75	6,42	6,41	2,01
PR3L_40	35,09	14,95	2,80	1,71	0,75	6,41	6,40	2,00
PR3L_41	35,31	15,04	2,82	1,72	0,76	6,45	6,44	2,01
PR3L_42	34,99	14,91	2,80	1,70	0,75	6,39	6,38	2,00
PR3L_43	34,94	14,88	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	1,99
PR3L_44	34,28	14,61	2,74	1,67	0,74	6,26	6,25	1,96
PR3L_45	34,40	14,66	2,75	1,67	0,74	6,28	6,27	1,96
PR3L_46	34,36	14,64	2,75	1,67	0,74	6,28	6,26	1,96
PR3L_47	35,61	15,17	2,85	1,73	0,76	6,50	6,49	2,03
PR3L_48	35,72	15,22	2,86	1,74	0,77	6,53	6,51	2,04
PR3L_49	35,84	15,27	2,86	1,74	0,77	6,55	6,53	2,04
PR3L_50	35,44	15,10	2,83	1,73	0,76	6,47	6,46	2,02
PR3L_51	35,35	15,06	2,82	1,72	0,76	6,46	6,44	2,02
PR3L_52	35,54	15,14	2,84	1,73	0,76	6,49	6,48	2,03
PR3L_53	35,92	15,30	2,87	1,75	0,77	6,56	6,55	2,05
PR3L_54	35,83	15,26	2,86	1,74	0,77	6,54	6,53	2,04
PR3L_55	35,82	15,26	2,86	1,74	0,77	6,54	6,53	2,04
PR3L_56	35,55	15,15	2,84	1,73	0,76	6,49	6,48	2,03
PR3L_57	35,92	15,30	2,87	1,75	0,77	6,56	6,55	2,05
PR3L_58	36,02	15,35	2,88	1,75	0,77	6,58	6,56	2,05
PR3L_59	35,62	15,18	2,85	1,73	0,76	6,51	6,49	2,03
PR3L_60	35,51	15,13	2,84	1,73	0,76	6,49	6,47	2,03
PR3L_61	35,58	15,16	2,84	1,73	0,76	6,50	6,48	2,03
PR3L_62	35,70	15,21	2,85	1,74	0,77	6,52	6,51	2,04
PR3L_63	35,21	15,01	2,81	1,71	0,75	6,43	6,42	2,01
PR3L_64	35,75	15,23	2,86	1,74	0,77	6,53	6,51	2,04
PR3L_65	35,63	15,18	2,85	1,73	0,76	6,51	6,49	2,03
PR3L_66	35,84	15,27	2,86	1,74	0,77	6,55	6,53	2,04
PR3L_67	35,31	15,05	2,82	1,72	0,76	6,45	6,43	2,01
PR3L_68	35,44	15,10	2,83	1,72	0,76	6,47	6,46	2,02
PR3L_69	35,38	15,07	2,83	1,72	0,76	6,46	6,45	2,02
PR3L_70	35,03	14,93	2,80	1,71	0,75	6,40	6,38	2,00
PR3L_71	35,23	15,01	2,82	1,71	0,76	6,43	6,42	2,01
PR3L_72	35,10	14,96	2,80	1,71	0,75	6,41	6,40	2,00
PR3L_73	35,21	15,01	2,81	1,71	0,75	6,43	6,42	2,01
PR3L_74	35,55	15,15	2,84	1,73	0,76	6,49	6,48	2,03

Продолжение табл. 1

Код точки	Суммарное	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_75	35,26	15,03	2,82	1,72	0,76	6,44	6,43	2,01
PR3L_76	35,21	15,00	2,81	1,71	0,76	6,43	6,42	2,01
PR3L_77	35,16	14,98	2,81	1,71	0,75	6,42	6,41	2,01
PR3L_78	35,42	15,10	2,83	1,72	0,76	6,47	6,45	2,02
PR3L_79	35,19	15,00	2,81	1,71	0,75	6,43	6,41	2,01
PR3L_80	35,38	15,08	2,83	1,72	0,76	6,46	6,45	2,02
37	35,33	15,05	2,82	1,72	0,76	6,45	6,44	2,02
32	35,2	15,00	2,81	1,71	0,75	6,43	6,41	2,01
25	35,29	15,04	2,82	1,72	0,76	6,44	6,43	2,01
26	35,26	15,02	2,82	1,72	0,76	6,44	6,43	2,01
PR8R	34,94	14,89	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	1,99
27	35,07	14,94	2,80	1,71	0,75	6,41	6,39	2,00
44	35,08	14,95	2,80	1,71	0,75	6,41	6,39	2,00
PR9R	33,75	14,21	2,72	1,66	0,73	6,23	6,22	1,92
49	33,84	14,25	2,73	1,66	0,73	6,25	6,23	1,92
PR10R	33,35	14,05	2,69	1,64	0,72	6,16	6,14	1,89
PR11R	33,51	14,11	2,70	1,65	0,73	6,18	6,17	1,90
PR12R	33,62	14,16	2,71	1,65	0,73	6,21	6,19	1,91
PR13R	33,54	14,12	2,70	1,65	0,73	6,19	6,18	1,91
70	33,37	14,06	2,69	1,64	0,72	6,16	6,14	1,90
71	33,68	14,19	2,71	1,65	0,73	6,22	6,20	1,91
PR14R	33,57	14,14	2,70	1,65	0,73	6,19	6,18	1,91
PR15R	33,80	14,24	2,72	1,66	0,73	6,24	6,22	1,92
PR16R	33,71	14,20	2,72	1,66	0,73	6,22	6,21	1,92
PR17R_1	33,56	14,14	2,70	1,65	0,73	6,19	6,18	1,91
PR7L	34,02	14,32	2,74	1,67	0,74	6,28	6,27	1,93
35	33,91	14,28	2,73	1,67	0,73	6,26	6,25	1,93
36	33,86	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
41	33,86	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
45	33,88	14,27	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
46	33,97	14,30	2,74	1,67	0,74	6,27	6,26	1,93
51	34,10	14,36	2,75	1,68	0,74	6,29	6,28	1,94
50	34,21	14,41	2,76	1,68	0,74	6,31	6,30	1,94
PR10L	33,96	14,30	2,74	1,67	0,74	6,27	6,25	1,93
PR9L	33,87	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
PR8L	33,85	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,23	1,92
PR12L	33,85	14,26	2,73	1,66	0,73	6,25	6,23	1,92
PR11L	33,87	14,27	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
54	33,87	14,27	2,73	1,66	0,73	6,25	6,24	1,92
PR13L	33,81	14,24	2,72	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
63	34,12	14,37	2,75	1,68	0,74	6,30	6,28	1,94
PR14L	33,83	14,25	2,73	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
67	34,24	14,42	2,76	1,68	0,74	6,32	6,30	1,94
PR16L	33,63	14,16	2,71	1,65	0,73	6,20	6,19	1,91
76	33,65	14,17	2,71	1,65	0,73	6,21	6,19	1,91
76_2	33,29	14,02	2,68	1,64	0,72	6,14	6,13	1,89
77_2	33,37	14,06	2,69	1,64	0,72	6,16	6,14	1,90
59	33,92	14,29	2,73	1,67	0,73	6,26	6,25	1,93
60	34,37	14,47	2,77	1,69	0,74	6,34	6,33	1,95
61	34,24	14,42	2,76	1,68	0,74	6,32	6,31	1,95
62	33,80	14,24	2,72	1,66	0,73	6,24	6,22	1,92
58	33,73	14,21	2,72	1,66	0,73	6,22	6,21	1,92
57	34,03	14,33	2,74	1,67	0,74	6,28	6,27	1,93
56	34,74	14,63	2,80	1,71	0,75	6,41	6,40	1,97
55	34,68	14,60	2,79	1,70	0,75	6,40	6,39	1,97
77	34,17	14,39	2,75	1,68	0,74	6,30	6,29	1,94
76_3	34,04	14,34	2,74	1,67	0,74	6,28	6,27	1,93
72	34,30	14,45	2,76	1,69	0,74	6,33	6,32	1,95
PR15L	34,86	14,68	2,81	1,71	0,75	6,43	6,42	1,98

Окончание табл. 1

Код точки	Суммарное	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
68	34,92	14,71	2,81	1,72	0,76	6,45	6,43	1,98
77_3	34,20	14,41	2,75	1,68	0,74	6,31	6,30	1,94
53	35,01	14,95	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	2,00
52	35,06	14,97	2,80	1,70	0,75	6,39	6,38	2,00
47	35,01	14,95	2,79	1,70	0,75	6,38	6,37	2,00
48	35,08	14,98	2,80	1,70	0,75	6,39	6,38	2,00
74	33,05	13,59	2,71	1,65	0,73	6,23	6,21	1,86
75	33,05	13,59	2,71	1,65	0,73	6,23	6,21	1,86
78	33,05	13,59	2,71	1,65	0,73	6,23	6,21	1,86
ПОЧВА 2	34,60	14,57	2,79	1,70	0,75	6,39	6,37	1,97
ПОЧВА 3	34,26	14,42	2,76	1,68	0,74	6,33	6,31	1,95
ПОЧВА 4	34,54	14,54	2,78	1,70	0,75	6,38	6,36	1,96
ПОЧВА 5	34,43	14,49	2,77	1,69	0,75	6,36	6,34	1,96
ПОЧВА 6	34,48	14,52	2,78	1,69	0,75	6,37	6,35	1,96
ПОЧВА 7	34,48	14,52	2,78	1,69	0,75	6,37	6,35	1,96
ПОЧВА 8	34,66	14,59	2,79	1,70	0,75	6,40	6,38	1,97
ПОЧВА 9	34,68	14,60	2,79	1,70	0,75	6,40	6,39	1,97
ПОЧВА 10	34,73	14,62	2,80	1,71	0,75	6,41	6,40	1,97
ПОЧВА 11	34,69	14,60	2,80	1,71	0,75	6,40	6,39	1,97
ПОЧВА 12	Некорректные исходные данные							
ПОЧВА 13	33,79	14,23	2,72	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
ПОЧВА 14	33,42	14,07	2,69	1,64	0,72	6,17	6,16	1,90
ПОЧВА 15	33,50	14,10	2,70	1,65	0,73	6,19	6,17	1,90
ПОЧВА 16	33,69	14,18	2,72	1,66	0,73	6,22	6,21	1,91
ПОЧВА 17	33,63	14,16	2,71	1,65	0,73	6,21	6,20	1,91
ПОЧВА 18	33,72	14,20	2,72	1,66	0,73	6,23	6,21	1,92
ПОЧВА 19	33,63	14,16	2,71	1,65	0,73	6,21	6,20	1,91
ПОЧВА 20	33,96	14,29	2,74	1,67	0,74	6,27	6,26	1,93
ПОЧВА 21	33,79	14,23	2,72	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
ПОЧВА 22	33,91	14,27	2,73	1,67	0,73	6,26	6,25	1,93
ПОЧВА 23	33,98	14,30	2,74	1,67	0,74	6,27	6,26	1,93
ПОЧВА 24	33,81	14,23	2,72	1,66	0,73	6,24	6,23	1,92
ПОЧВА 25	33,59	14,14	2,71	1,65	0,73	6,20	6,19	1,91
ПОЧВА 26	33,66	14,17	2,71	1,65	0,73	6,21	6,20	1,91
ПОЧВА 27	Некорректные исходные данные							
ПОЧВА 28	34,04	14,34	2,74	1,67	0,74	6,28	6,27	1,93
ПОЧВА 29	34,32	14,46	2,76	1,69	0,74	6,33	6,32	1,95
ПОЧВА 30	34,92	14,71	2,81	1,72	0,76	6,45	6,43	1,98

Статистический анализ сформированной выборки значений мощности дозы показал отсутствие корреляции между высотой над уровнем моря и суммарной МЭД от космического излучения (коэффициент корреляции Спирмена $k = 0,149$ при уровне значимости $p = 0,05$). Вероятно, это связано с разной интенсивностью космического излучения в даты проведения полевых исследований. Максимальное значение суммарной МЭД космического излучения – 37,41 нЗв/ч в точке с кодом PR3L_5 (дата – 24.11.2022), минимальное значение – 33,05 нЗв/ч в точке с кодом 75 (дата – 14.08.2025). Разница между максимальным и минимальным значением МЭД составила 11,7 %.

В табл. 2 представлены результаты расчета парциального вклада составляющих космического излучения в суммарную МЭД.

Таблица 2. Вклад составляющих космического излучения в МЭД, %

Код точки	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_2	44,47	7,74	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_3	44,48	7,74	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_4	44,48	7,74	4,69	2,07	17,54	17,50	5,78
PR3L_5	44,48	7,74	4,69	2,07	17,54	17,49	5,78
PR3L_6	44,46	7,75	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_7	44,46	7,75	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_8	44,46	7,75	4,69	2,07	17,54	17,50	5,79
PR3L_9	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_10	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_11	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_12	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_13	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_14	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_15	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_16	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_17	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_18	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_19	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_20	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_21	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_22	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_23	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_24	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_25	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_26	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_27	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_28	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_29	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_30	43,05	7,93	4,83	2,13	18,09	18,05	5,72
PR3L_31	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_32	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_33	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_34	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_35	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_36	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_37	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_38	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_39	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_40	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_41	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,23	5,70
PR3L_42	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_43	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_44	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_45	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_46	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_47	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,70
PR3L_48	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_49	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
PR3L_50	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_51	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_52	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_53	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_54	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_55	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_56	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_57	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_58	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_59	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71

Продолжение табл. 2

Код точки	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
PR3L_60	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_61	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_62	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_63	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_64	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_65	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_66	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_67	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_68	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_69	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_70	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_71	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_72	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_73	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_74	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_75	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_76	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_77	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
PR3L_78	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_79	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR3L_80	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
37	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
32	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
25	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
26	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR8R	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
27	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
44	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
PR9R	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
49	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR10R	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
PR11R	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
PR12R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR13R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
70	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
71	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR14R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR15R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR16R	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR17R_1	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR7L	42,10	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
35	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
36	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
41	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
45	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
46	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
51	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
50	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR10L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR9L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR8L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR12L	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
PR11L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
54	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR13L	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
63	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
PR14L	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
67	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
PR16L	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68

Окончание табл. 2

Код точки	Нейтроны	Фотоны	Электроны	Позитроны	Отрицательные мюоны	Положительные мюоны	Протоны
76	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
76_2	42,13	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
77_2	42,13	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
59	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
60	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
61	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
62	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
58	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
57	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
56	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
55	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
77	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
76_3	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
72	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
PR15L	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
68	42,12	8,06	4,91	2,16	18,46	18,41	5,68
77_3	42,12	8,05	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
53	42,70	7,98	4,86	2,14	18,23	18,19	5,71
52	42,70	7,98	4,86	2,14	18,23	18,19	5,71
47	42,70	7,98	4,86	2,14	18,23	18,19	5,71
48	42,69	7,98	4,86	2,14	18,23	18,19	5,71
74	41,13	8,19	5,01	2,21	18,84	18,80	5,63
75	41,12	8,19	5,01	2,21	18,84	18,80	5,63
78	41,12	8,19	5,01	2,21	18,84	18,80	5,63
ПОЧВА 2	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
ПОЧВА 3	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,23	5,70
ПОЧВА 4	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
ПОЧВА 5	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
ПОЧВА 6	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
ПОЧВА 7	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
ПОЧВА 8	42,60	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,71
ПОЧВА 9	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,70
ПОЧВА 10	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
ПОЧВА 11	42,60	7,99	4,87	2,14	18,27	18,22	5,71
ПОЧВА 12	Некорректные исходные данные						
ПОЧВА 13	42,10	8,06	4,92	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 14	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
ПОЧВА 15	42,61	7,99	4,87	2,14	18,26	18,22	5,70
ПОЧВА 16	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
ПОЧВА 17	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
ПОЧВА 18	42,10	8,06	4,92	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 19	42,12	8,06	4,91	2,16	18,45	18,41	5,68
ПОЧВА 20	42,10	8,06	4,92	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 21	42,10	8,06	4,92	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 22	42,10	8,06	4,91	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 23	42,10	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 24	42,10	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 25	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 26	42,10	8,06	4,91	2,17	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 27	Некорректные исходные данные						
ПОЧВА 28	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 29	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68
ПОЧВА 30	42,11	8,06	4,91	2,16	18,46	18,42	5,68

Вклад отдельных составляющих в суммарную МЭД, %: нейтроны – 42,53 > отрицательно заряженные мюоны – 18,29 > положительно заряженные мюоны – 18,25 > фотоны – 8,00 > протоны – 5,70 > электроны – 4,87 > позитроны – 2,15. Вклад

остальных источников космического излучения в суммарную МЭД составил менее 1 %.

Для исследования временных характеристик космического излучения на территории заповедника в качестве примера были взяты три точки: в центре заповедника, а также на его северной и южной границах. В табл. 3 приведена характеристика трех исследуемых точек.

Таблица 3. Характеристика исследуемых точек

Точка	Координаты	Высота, м
Северная	55,97413 С. Ш., 61,03663 В. Д.	248
Центральная	55,87106 С. Ш., 60,95952 В. Д.	241
Южная	55,76813 С. Ш., 60,81383 В. Д.	264

Разница между максимальной высотой в южной точке и минимальной высотой в центральной точке составила 8,7 %.

В табл. 4 представлены результаты расчета ежемесячной МЭД космического излучения, усредненной за период с начала аварии на химкомбинате «Маяк» в 1957 г. по настоящее время – 2025 г.

Таблица 4. Результаты расчета ежемесячной МЭД космического излучения, усредненной за период с 1957 по 2025 г.

Месяц	МЭД, нЗв/ч		
	Северная точка	Центральная точка	Южная точка
Январь	36,42	36,24	36,77
Февраль	36,47	36,28	36,81
Март	36,50	36,31	36,84
Апрель	36,48	36,30	36,82
Май	36,35	36,17	36,69
Июнь	36,20	36,02	36,54
Июль	36,12	35,94	36,46
Август	36,15	35,97	36,49
Сентябрь	36,25	36,07	36,59
Октябрь	36,43	36,24	36,77
Ноябрь	36,34	36,16	36,69
Декабрь	36,42	36,24	36,77
Среднее	36,42	36,24	36,77

Из табл. 4 можно сделать вывод, что среднее значение МЭД за весь период наблюдений в южной точке – наибольшее. Разница между максимальным (южная точка) и минимальным (центральная точка) средним значением составила всего 2,45 %. Среднее значение в период между днями зимнего и летнего солнцестояния (январь – июнь), а также между днями летнего и зимнего солнцестояния (июль – декабрь) отличается не более чем на 1 %.

Для наглядности на рис. 3 представлена временная диаграмма МЭД космического излучения в период с 1957 по 2025 г. в южной точке.

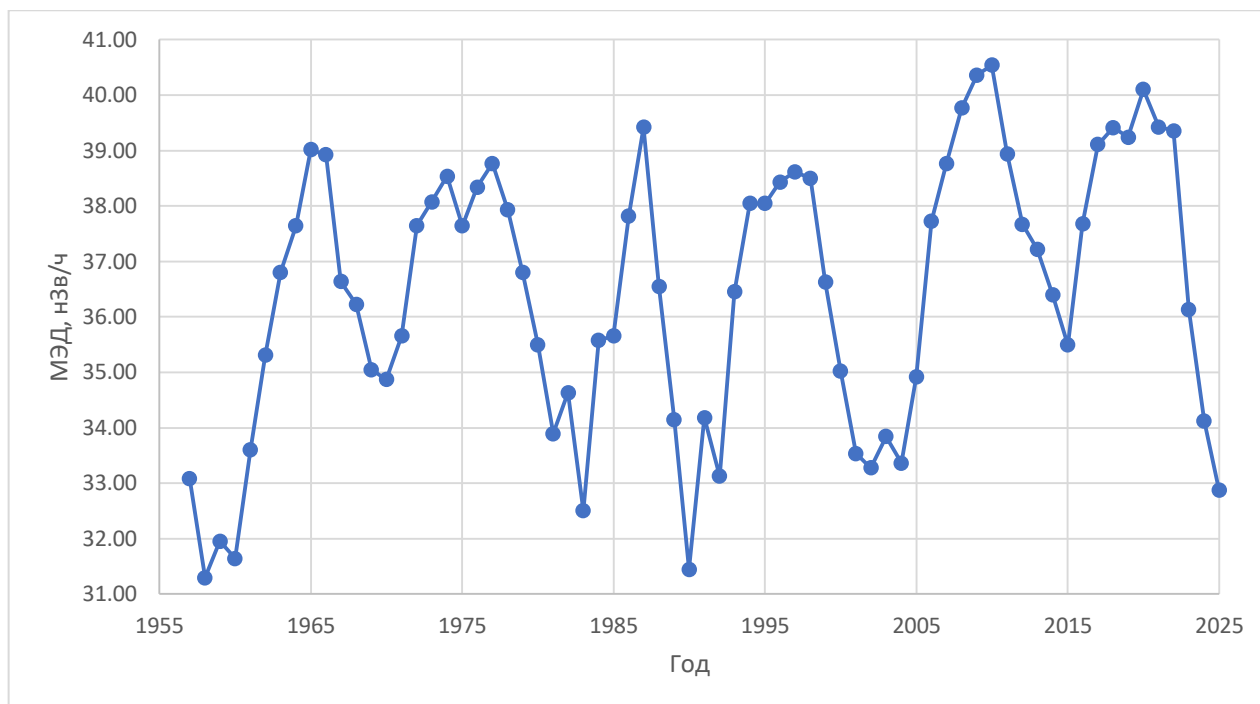


Рис. 3. Временная диаграмма МЭД космического излучения в период с 1957 по 2025 г.

Диаграмма иллюстрирует наличие максимумов и минимумов с разницей в 9–12 лет, что соответствует разнице в динамике солнечной активности. Максимальное значение МЭД космического излучения наблюдается в 2010 г. – 40,54 нЗв/ч, минимальное – 31,30 нЗв/ч в 1958 г. Разница между ними составила 22,8 %. Среднее значение МЭД космического излучения за весь период наблюдений – 36,45 нЗв/ч. Разница между максимальным значением МЭД и средним – 10,1 %, между средним и минимальным значением МЭД – 14,1 %.

4. Обсуждение

С помощью программы CARI-7 была рассчитана МЭД космического излучения в 170 точках в период проведения полевых исследований. Максимальное значение – 37,41 нЗв/ч в точке с кодом PR3L_5, минимальное значение – 33,05 нЗв/ч в точке с кодом 75. Основной вклад (более 99 %) в суммарную МЭД обусловлен нейтронами, отрицательными и положительными мюонами, протонами, фотонами, электронами, а также позитронами. Наибольший вклад в суммарную МЭД обусловлен нейтронами – 42,53 %. Средняя МЭД, обусловленная нейтронами, в 12,5 раз превышает фотонную составляющую. Энергетический спектр космогенных нейтронов на поверхности Земли охватывает огромный диапазон – от 10^{-9} до 10^3 МэВ, в котором можно выделить три пика: область тепловых, быстрых и сверхбыстрых нейтронов [21–23]. Однако наибольший вклад в МЭД вносят быстрые нейтроны с энергией от 1 до 10 МэВ [22, 23]. Также отметим, что среди рассмотренных видов излучения взвешивающие коэффициенты, согласно Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) для нейтронов этого диапазона, – наибольшие (от 9 до 20 для 10 и 1 МэВ соответственно) [24].

Выполнен расчет ежемесячной МЭД космического излучения, усредненной за период с начала радиационной аварии на химкомбинате «МАЯК» в 1957 г. по настоящее время – 2025 г. Анализ данных показал отсутствие существенных различий между средним значением МЭД в период между днями зимнего и летнего солнцестояния (январь – июнь), а также между днями летнего и зимнего солнцестояния (июль – декабрь) в исследуемый период – 1957–2025 гг. Разница между максимальным (в южной точке) и минимальным (в центральной точке) средним

значением МЭД космического излучения составила 2,45 % при разнице в соответствующих высотах в 8,7 %.

Результаты работы позволят в перспективе учитывать космическое излучение для оценки радиационной обстановки на территории Восточно-Уральского заповедника – головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС).

5. Выводы

Рассчитана МЭД космического излучения в 170 точках на территории заповедника.

Не менее 99 % МЭД космического излучения на территории заповедника формируется нейтронами, мюонами, протонами, фотонами, электронами, и позитронами.

Средняя МЭД космического излучения в период полевых исследований 2022–2025 гг. – 35,71 нЗв/ч. Разница между максимальным (39,67 нЗв/ч) и минимальным (32,00 нЗв/ч) значением МЭД составила 19,3 %.

Наибольший вклад (42,53 %) в суммарную МЭД вносят нейтроны.

Статистический анализ показал отсутствие корреляции между высотой над уровнем моря и суммарной МЭД от космического излучения, т. к. расчет производился для разных календарных дат.

Построена временная диаграмма МЭД космического излучения за 69-летний период (1957–2025 гг.). Диаграмма иллюстрирует наличие максимумов и минимумов с разницей в 9–12 лет, что соответствует периодам в динамике солнечной активности.

Разница между максимальным значением и минимальным значением МЭД за этот период составила 11,7 %. Среднее значение МЭД космического излучения за весь период наблюдений – 34,75 нЗв.

6. Благодарности

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

Авторы выражают благодарность в. н. с., к. ф.-м. н. Алексею Акимовичу Екидину и г. н. с., д. т. н. Михаилу Владимировичу Жуковскому за консультации и научные дискуссии по данной теме.

7. Список литературы

1. *Dorman, I. V.* How cosmic rays were discovered and why they received this misnomer / I. V. Dorman, L. I. Dorman // *Advances in Space Research.* – 2014. – Vol. 53, №. 10. – P. 1388–1404.
2. *Ziegler, J. F.* Terrestrial cosmic rays / J. F. Ziegler // *IBM journal of research and development.* – 1996. – Vol. 40, №. 1. – С. 19–39.
3. *Ardana, I. M.* An analysis of air crew exposure from cosmic radiation on Indonesian domestic flight / I. M. Ardana, A. Sanyoto, K. Rumboko // *2020 Annual Nuclear Safety Seminar Proceeding: Innovations to Support Nuclear Safety and Security for Advanced Human Resources and Excellent Indonesia.* – 2020. – № INIS-ID–103. – P. 57–63.
4. *Pacini, A. A.* Cosmic rays: bringing messages from the sky to the Earth's surface / A. A. Pacini // *Revista Brasileira de Ensino de Física.* – 2017. – Vol. 39. – №. 1. – С. e1306.
5. *Десятов, Д. Д.* Вклад АЭС с различным типом реакторных установок в глобальное поступление трития в окружающую среду / Д. Д. Десятов, А. А. Екидин, Д. А. Власов // *Атомная энергия.* – 2024. – Т. 137, №. 3–4. – С. 175–180.
6. *Назаров, Е. И.* Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС / Е. И. Назаров, А. А. Екидин, А. В. Васильев // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2018. – Т. 61, №. 12–2. – С. 67–73.
7. *Reames, D. V.* Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere / D. V. Reames // *Space Science Reviews.* – 1999. – Vol. 90, №. 3. – P. 413–491.

8. Japanese population dose from natural radiation / Y. Omori, M. Hosoda, F. Takahashi [et al.] // Journal of Radiological Protection. – 2020. – 40(3), R99–R140. – <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab73b1>.
9. Real-time auroral and solar activity [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.spaceweatherlive.com/> (дата обращения: 01.07.2025).
10. External effective dose from natural radiation for the Umbria region (Italy) / K. G. C. Raptis, M. Alberi, S. Bisogno [et al.] // Journal of Maps. – 2022. – Vol. 18, №. 2. – P. 461–471. – <https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2093659>.
11. FAA. (2021). Program to calculate galactic cosmic radiation. – URL: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7/ (дата обращения: 01.07.2025).
12. Sato, T. Analytical model for estimating terrestrial cosmic Ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS / T. Sato // Plos One. – 2015. – Vol. 10, № 12. – P. e0144679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144679>.
13. Aközcan, S. Annual effective dose of naturally occurring radionuclides in soil and sediment / S. Aközcan // Toxicological & Environmental Chemistry. – 2014. – Vol. 96, № 3. – P. 379–386. <https://doi.org/10.1080/02772248.2014.939177>.
14. Spatial relationship between the field-measured ambient gamma dose equivalent rate and geological conditions in a granitic area, Velence Hills, Hungary: an application of digital spatial analysis methods / S. B. Torres, A. Petrick, K. Z. Szabo [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2018. – Vol. 192. – P. 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.07.001>.
15. Рамзаев, В. П. Валидация метода определения плотности загрязнения почвы ¹³⁷Cs на огородах с использованием портативного спектрометра-дозиметра МКС АТ6101Д in situ / В. П. Рамзаев, А. Н. Барковский, А. А. Братилова // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14, №. 2. – С. 56–65.
16. Метод неразрушающего контроля удельной активности природных радионуклидов в строительных материалах / А. В. Васильев, А. А. Екидин, М. Д. Пышкина [и др.] // АНРИ. – 2021. – №. 1. – С. 31–44.
17. Общественное содействие в обеспечении радиационной безопасности в зоне наблюдения ФГУП «ПО «МАЯК» / В. С. Носовец, А. Р. Зигангиров, Е. С. Макеева [и др.] // Траектория исследований. – 2023. – №. 2(6). – С. 45–56.
18. Статистические характеристики гамма-поля на территории Восточно-Уральского государственного заповедника: показания переносных средств измерения / А. А. Екидин, Д. Д. Десятов, Е. И. Назаров [и др.] // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2025. – № 3(15). – С. 19–70.
19. Хаджинова К. А. Дозиметрический мониторинг при авиаперелетах / К. А. Хаджинова // 60-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. – 2024. – С. 343–349.
20. Атлас ВУРСа. – URL: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/page_120-126.html. (дата обращения: 01.07.2025).
21. Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes. Supplement to Technical Reports Series No. 318. Vienna: IAEA, 2001. – 337 p.
22. Nakamura, T. Cosmic-ray neutron spectrometry and dosimetry / T. Nakamura // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – Vol. 45, №. sup5. – P. 1–7.
23. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3. Vienna : IAEA, 2014. – 471 p.
24. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / пер с англ. : под общей ред. М. Ф. Киселева и Н. К. Шандалы. – М. : Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

Сведения об авторах:

Молчанов Сергей Михайлович, аспирант УрФУ, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия Эл. почта: molchanov.2001@bk.ru.

Десятов Денис Дмитриевич, м. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

COSMIC RADIATION MODELING ON THE EAST-URALS STATE RESERVE TERRITORY USING THE CARI-7 PROGRAM

S. M. Molchanov ^{1,2}, D. D. Desyatov ²

¹ Ural Federal University named by the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

² Institute of Industrial Ecology of UB RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

The effective dose rate (EDR) due to cosmic radiation on the East-Urals State Reserve territory was carried out using the CARI-7 software. The ranges of changes in the EDR of cosmic radiation from 32,00 to 39,67 nSv/h is shown for the period 2022–2025. The average EDR of cosmic radiation during this period is 35,71 nSv/h. The contribution of individual types of cosmic radiation to the total EDR was calculated. The largest contribution to the EDR is due to neutrons – 42,53 %. The average value of the cosmic radiation EDR from the moment of Mayak Chemical Plant accident to the present time in the territory of the East Ural State State Reserve is 34,75 nSv/h.

Key words: cosmic radiation; East-Ural State Reserve; gamma radiation; neutron radiation; dose rate; CARI-7.

References

1. Dorman, I. V. How cosmic rays were discovered and why they received this misnomer / I. V. Dorman, L. I. Dorman // *Advances in Space Research*. – 2014. – Vol. 53, №. 10. – P. 1388–1404.
2. Ziegler, J. F. Terrestrial cosmic rays / J. F. Ziegler // *IBM journal of research and development*. – 1996. – Vol. 40, №. 1. – C. 19–39.
3. Ardana, I. M. An analysis of air crew exposure from cosmic radiation on Indonesian domestic flight / I. M. Ardana, A. Sanyoto, K. Rumboko // *2020 Annual Nuclear Safety Seminar Proceeding: Innovations to Support Nuclear Safety and Security for Advanced Human Resources and Excellent Indonesia*. – 2020. – № INIS-ID–103. – P. 57–63.
4. Pacini, A. A. Cosmic rays: bringing messages from the sky to the Earth's surface / A. A. Pacini // *Revista Brasileira de Ensino de Física*. – 2017. – Vol. 39. – №. 1. – C. e1306.
5. Desyatov, D. D. Global release of tritium into the environment: NPP reactor type contribution / D. D. Desyatov, A. A. Ekidin, D. A. Vlasov // *Atomic Energy*. – 2024. – Vol. 137, №. 3–4. – C. 198–205.
6. Nazarov, E. I. Assessment of the atmospheric carbon-14 caused by NPP emissions / E. I. Nazarov, A. A. Ekidin, A. V. Vasylyev // *Izvestiya vuzov. Fizika*. – 2018. – Vol. 61, №. 12–2. – P. 67–73.
7. Reames, D. V. Particle acceleration at the Sun and in the heliosphere / D. V. Reames // *Space Science Reviews*. – 1999. – Vol. 90, №. 3. – P. 413–491.
8. Japanese population dose from natural radiation / Y. Omori, M. Hosoda, F. Takahashi [et al.] // *Journal of Radiological Protection*. – 2020. – 40(3), R99–R140. – <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab73b1>.
9. Real-time auroral and solar activity [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.spaceweatherlive.com/> (дата обращения: 01.07.2025).
10. External effective dose from natural radiation for the Umbria region (Italy) / K. G. C. Raptis, M. Alberi, S. Bisogno [et al.] // *Journal of Maps*. – 2022. – Vol. 18, №. 2. – P. 461–471. – <https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2093659>.
11. FAA. (2021). Program to calculate galactic cosmic radiation. – URL: https://www.faa.gov/data_research/research/med_humanfacs/aeromedical/radiobiology/cari7/ (дата обращения: 01.07.2025).
12. Sato, T. Analytical model for estimating terrestrial cosmic Ray fluxes nearly anytime and anywhere in the world: Extension of PARMA/EXPACS / T. Sato // *Plos One*. – 2015. – Vol. 10, №. 12. – P. e0144679. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144679>.
13. Aközcan, S. Annual effective dose of naturally occurring radionuclides in soil and sediment / S. Aközcan // *Toxicological & Environmental Chemistry*. – 2014. – Vol. 96, №. 3. – P. 379–386. <https://doi.org/10.1080/02772248.2014.939177>.

14. Spatial relationship between the field-measured ambient gamma dose equivalent rate and geological conditions in a granitic area, Velence Hills, Hungary: an application of digital spatial analysis methods / S. B. Torres, A. Petrick, K. Z. Szabo [et al.] // Journal of environmental radioactivity. – 2018. – Vol. 192. – P. 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.07.001>.
15. Ramzaev, V. P. Validation of a method for in situ determination of ¹³⁷Cs soil contamination density in kitchen gardens using the portable spectrometer-dosimeter MKS AT6101D / V. P. Ramzaev, A. N. Barkovsky, A. A. Bratilova // Radiation Hygiene. – 2021. – V. 14. – № 2. – P. 56–65.
16. Method of Non-Destructive Measurement of Natural Radionuclides Concentration in Building Materials / A. V. Vasilyev, A. A. Ekinin, M. D. Pyshkina [et al.] // ANRI. – 2021. – № 1. – P. 31–44.
17. Experience of independent radiation control in publicly accessible sites of the «FSUE MAYAK PA» monitoring area / V. S. Nosovets, A. R. Zigangirov, E. S. Makeeva [et al.] // Research trajectory – human, nature, technologies. – 2023. – № 2. – P. 45–56.
18. Statistical characteristics of the gamma field in the territory of the East Ural State Reserve: readings from portable measuring instruments / A. A. Ekinin, D. D. Desyatov, E. I. Nazarov [et al.] // Research trajectory – human, nature, technologies. – 2025. – № 3(15). – P. 19–70.
19. Hadzhinova, K. A. Dozimetricheskiy monitoring pri aviapereletah / K. A. Hadzhinova // 60-ya yubilejnaya nauchnaya konferenciya aspirantov, magistrantov i studentov BGUIR – 2024. – P. 343–349.
20. Atlas VURSa. – URL: http://downloads.igce.ru/publications/Atlas/CD_VURS/page_120-126.html. (accessed: 01.07.2025). (in Russian).
21. Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes. Supplement to Technical Reports Series No. 318. Vienna: IAEA, 2001. – 337 p.
22. Nakamura, T. Cosmic-ray neutron spectrometry and dosimetry / T. Nakamura // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2008. – Vol. 45, №. sup5. – P. 1–7.
23. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements Part 3. Vienna : IAEA, 2014. – 471 p.
24. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103, 2007.