

ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭРИТРОЦИТОВ И ГЕМОГЛОБИНА У ЛИЦ, ПОДВЕРГШИХСЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ ХРОНИЧЕСКОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

Брагин Е.В., Григорьева Е.С., Азизова Т.В.*

ФГБУН «Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики» ФМБА России,
456783, г. Озерск, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Введение. Система гемопозза чувствительна к воздействию ионизирующего излучения. В то же время количество исследований, посвященных оценке гемопозических эффектов в когортах лиц, подвергшихся хроническому облучению, крайне ограничено.

Цель: оценить показатели эритроцитов и гемоглобина и их динамики у лиц, подвергшихся хроническому облучению.

Материалы и методы. Изучаемая когорта — работники ПО «Маяк», нанятые на предприятие в период 1948–1952 гг. (7391 человек). Период наблюдения — 15 лет с момента найма работника. В исследование включены 156 490 общих анализов периферической крови. К концу периода наблюдения средняя суммарная поглощенная в костном мозге доза внешнего гамма-излучения составила $0,81 \pm 0,79$ Гр у мужчин и $0,55 \pm 0,62$ Гр у женщин; средняя годовая доза — $0,10 \pm 0,20$ и $0,07 \pm 0,015$ Гр и средняя максимальная годовая доза — $0,33 \pm 0,39$ и $0,22 \pm 0,27$ Гр соответственно.

Результаты. Среднее количество эритроцитов и концентрация гемоглобина у работников изучаемой когорты оставались в пределах границ физиологической нормы с незначительными колебаниями на протяжении всего периода наблюдения. Количество эритроцитов и концентрация гемоглобина в периферической крови резко снижались в первые годы после начала контакта с источниками ионизирующего излучения, когда у работников изучаемой когорты были зарегистрированы наиболее высокие годовые поглощенные в костном мозге дозы гамма-излучения, как у мужчин, так и у женщин, с последующим постепенным восстановлением. Различия были статистически значимыми по сравнению с данными предварительного медицинского осмотра, однако полного восстановления до значений предварительного медицинского осмотра не зарегистрировано. Концентрация гемоглобина также не выходила за пределы границ физиологической нормы в течение всего периода наблюдения, однако после периода восстановления постепенно снижалась к концу периода наблюдения по сравнению с концентрацией, зарегистрированной на предварительном медицинском осмотре. Анализ зависимости изучаемых показателей от дозы внешнего гамма-облучения выявил статистически значимую зависимость количества эритроцитов и концентрации гемоглобина от дозы облучения ($p < 0,05$).

Заключение. У женщин при входном медицинском осмотре количество эритроцитов и концентрация гемоглобина были значимо ниже по сравнению с мужчинами; в первые 15 лет работы средние показатели эритроцитов и гемоглобина были значимо ниже по сравнению с входным медицинским осмотром; количество эритроцитов и концентрация гемоглобина значимо зависели от дозы внешнего гамма-облучения.

Ключевые слова: система кроветворения, эритроциты, гемоглобин, профессиональное хроническое облучение, гамма-излучение

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование проведено в рамках Государственного контракта от 15 июня 2021 г. № 11.313.21.2 с Федеральным медико-биологическим агентством «Оценка медико-биологических эффектов хронического радиационного воздействия и механизмов их развития для оптимизации методологий раннего выявления последствий облучения» (шифр: «Иммуногемопоз-21»).

Для цитирования: Брагин Е.В., Григорьева Е.С., Азизова Т.В. Динамика показателей эритроцитов и гемоглобина у лиц, подвергшихся профессиональному хроническому облучению. Гематология и трансфузиология. 2025; 70(4):455–464. <https://doi.org/10.35754/0234-5730-2025-70-4-455-464>

TRENDS IN RED BLOOD CELLS AND HEMOGLOBIN LEVELS IN INDIVIDUALS CHRONICALLY EXPOSED TO IONIZING RADIATION DURING OCCUPATIONAL ACTIVITIES

Bragin E.V., Grigoryeva E.S., Azizova T.V.*

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency, 456783, Russia, Ozyorsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The hematopoietic system is sensitive to ionizing radiation. At the same time, research on hematopoietic effects in cohorts of individuals who are chronically exposed to ionizing radiation is quite limited.

Objective. To evaluate red blood cell and hemoglobin levels, and to analyze their changes over time in individuals chronically exposed to ionizing radiation.

Material and methods. The study cohort consisted of nuclear workers of the Mayak PA who were hired between 1948 and 1952, totaling 7,391 individuals. These workers were followed for a period of 15 years starting from their date of hire. The analyzed dataset included 156,490 peripheral blood counts. At the end of the follow-up period, the mean accumulated red bone absorbed dose of gamma rays from external exposure was 0.81 ± 0.79 Gy for males and 0.55 ± 0.62 Gy for females. The mean annual gamma dose was 0.10 ± 0.20 Gy for males and 0.07 ± 0.15 Gy for females, and the mean maximum annual gamma dose was 0.33 ± 0.39 for males and 0.22 ± 0.27 Gy for females.

Results. The mean red blood cell and hemoglobin levels in the study cohort of workers remained within the normal physiological range, showing only slight fluctuations throughout the entire follow-up period. Both red blood cell and hemoglobin levels in the peripheral blood decreased significantly in the first few years after the beginning of contact with ionizing radiation sources, when the highest annual absorbed gamma doses in red bone were recorded for both male and female workers. After these initial years, red blood cell and hemoglobin levels eventually returned to normal. The differences were statistically significant when the levels in first years of employment were compared to the levels reported during pre-employment health check-ups. However, no complete recovery to the pre-employment levels was observed. The hemoglobin concentration also remained within the normal physiological range throughout the entire follow-up period. However, after the recovery period, it gradually decreased until the end of the follow-up, compared to the pre-employment level. The analysis of these blood parameters in relation to gamma-ray dose from external exposure revealed a significant association of red blood cell and hemoglobin concentration with the radiation dose ($p < 0,05$).

Conclusion. Red blood cell levels and hemoglobin concentrations registered at the pre-employment health check-up were significantly lower in females than males. In the first 15 years of employment, the mean red blood cell and hemoglobin levels were significantly decreased compared to the pre-employment levels. The red blood cell level and hemoglobin concentration were significantly associated with the gamma-ray dose from external exposure.

Keywords: hematopoietic system, red blood cells, hemoglobin, occupational chronic radiation exposure, gamma rays

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Funding: the study was conducted under a state contract with the Federal Medical Biological Agency, dated 15 June, 2021, number 11.313.21.2, "Assessment of medical and biological effects following chronic radiation exposure and their mechanisms aimed to improve the methodology for the early detection of radiation exposure effects" (code: Immunohemopoes-2021).

For citation: Bragin E.V., Grigoryeva E.S., Azizova T.V. Trends in red blood cells and hemoglobin levels in individuals chronically exposed to ionizing radiation during occupational activities. Russian Journal of Hematology and Transfusiology (Gematologiya i transfuziologiya). 2025; 70(4):455–464 (in Russian). <https://doi.org/10.35754/0234-5730-2025-70-4-455-464>

Введение

Кроветворная система, структурно и функционально связанная с иммунной системой, поддерживает устойчивое количество клеток в периферической крови и иммунный гомеостаз. В многочисленных экспериментальных и эпидемиологических исследованиях показано, что система гемопоеза, как и другие высокопролиферативные ткани, чувствительна к воздействию ионизирующего излучения [1]. Поскольку система кроветворения состоит из нескольких компонентов, структурно и функционально связанных с другими системами организма, то и чувствительность этих компонентов к воздействию ионизирующего излучения различается.

Существует значительное количество работ, посвященных гемопоэтическим эффектам при остром и фракционированном облучении в различных группах лиц (лица, пережившие атомную бомбардировку в Японии; лица, подвергшиеся облучению вследствие радиотерапии; лица, подвергшиеся облучению в результате несчастных случаев или аварийного облучения) [1–6], в результате которых определены зависимости «доза-эффект» в системе кроветворения. В то же время количество исследований, посвященных оценке гемопоэтических эффектов при хроническом облучении, крайне ограничено [7–15]. Причем во всех исследованиях основное внимание уделено показателям тромбоцитов, гранулоцитов и лимфоцитов, в то время как влияние ионизирующего излучения, и особенно хронического облучения, на эритроидный компонент системы кроветворения у человека изучено недостаточно.

Целью настоящего исследования являлась оценка количества эритроцитов и концентрации гемоглобина в периферической крови и их динамики у лиц, подвергшихся профессиональному хроническому облучению.

Материалы и методы

Исследуемая когорта и период наблюдения. Настоящее ретроспективное исследование проведено в когорте работников предприятия атомной промышленности производственного объединения (ПО) «Маяк», начавшего свою деятельность на Южном Урале вблизи г. Озерске в июне 1948 г. ПО «Маяк» включало в себя основные заводы (реакторы, радиохимический и плутониевый заводы) и вспомогательные производства (ремонтно-механический цех, завод водоподготовки, цех электрических сетей и подстанций и др.) [16]. В когорту были включены все работники, впервые нанятые на основные заводы ПО «Маяк» в 1948–1952 гг. (7391 человек), независимо от пола, возраста, национальности, образования, социального статуса и других характеристик. С течением времени работники выбывали из-под наблюдения из-за смерти, выезда из г. Озерске на другое постоянное место жительства, потери медицин-

ской документации. Чтобы избежать систематической ошибки, которую могут вносить отсутствующие данные, обусловленные выбывшими из-под наблюдения, на настоящем этапе исследования период наблюдения был ограничен 15 годами с момента найма работника на предприятие.

Исследуемые показатели. Изучаемым эффектом являлись количество эритроцитов и концентрация гемоглобина. Информация о результатах гематологических обследований и перенесенных заболеваниях за весь период проживания в г. Озерске была собрана на 95% работников изучаемой когорты и внесена в медико-дозиметрическую базу данных «Клиника» [17, 18]. Источниками информации являлись архивные и текущие медицинские карты, истории болезни были подробно описаны ранее [17, 18]. Все болезни и причины смерти были закодированы в соответствии с Международной статистической классификацией болезней 9-го пересмотра (МКБ-9) [19]. Гематологическое обследование работников ПО «Маяк» включало обязательное предварительное медицинское обследование до начала работы на предприятии и регулярные ежегодные плановые периодические медицинские обследования всех работников по единой стандартной программе, а также углубленные обследования в специализированном медицинском учреждении один раз в 3–5 лет.

Исследование клеточного состава периферической крови проводили с использованием стандартных лабораторных методов. Забор крови проводили натощак в утренние часы по стандартной методике. До 1969 г. количество эритроцитов и лейкоцитов подсчитывали в камере Горяева, а тромбоцитов — в мазках, окрашенных по Фонию [20]. Позже количество клеток в периферической крови оценивали с использованием полуавтоматических и автоматических гематологических анализаторов. Подсчет лейкоцитарной формулы крови в течение всего периода наблюдения проводили микроскопически в мазках, окрашенных по методу Романовского — Гимзы [21]. В таблице 1 представлены принятые референтные значения физиологической нормы [22].

Дозиметрия. В первые годы условия работы на ПО «Маяк» были наиболее неблагоприятными, т. к. работники подвергались воздействию ионизирующего излучения в дозах, превышающих предельно допустимые [23]. В настоящем исследовании использованы дозы внешнего гамма-излучения дозиметрической системы работников ПО «Маяк» — 2008 (ДСРМ-2008) [24]. В ДСРМ-2008 доступны годовые поглощенные дозы на 18 органов, поэтому в настоящем исследовании была использована индивидуальная поглощенная в костном мозге доза внешнего гамма-излучения. Средние дозы гамма-облучения у работников изучаемой когорты к концу периода наблюдения (15 лет

Таблица 1. Нормальные значения показателей красной крови
Table 1. Normal blood count indices

Показатель/Index	Нормальные значения Normal values	
	Мужчины Males	Женщины Females
Количество эритроцитов, $\times 10^{12}/\text{л}$ Number of red blood cells, $\times 10^{12}/\text{L}$	4,0–5,0	3,9–4,7
Концентрация гемоглобина, г/л Hemoglobin concentration, g/L	130–185	120–165

Таблица 2. Средние дозы облучения у работников изучаемой когорты
Table 2. Mean radiation doses in workers of the analyzed cohort

Доза внешнего гамма-излучения, поглощенная в костном мозге, Гр, Среднее \pm СО Gamma-ray dose from external exposure, absorbed in the bone marrow, Gy, Mean \pm SD	Мужчины Males	Женщины Females
Средняя суммарная/Mean accumulated dose	0,81 \pm 0,79	0,55 \pm 0,62
Средняя годовая/Mean annual dose	0,10 \pm 0,20	0,07 \pm 0,015
Средняя максимальная годовая доза Mean maximum annual dose	0,33 \pm 0,39	0,22 \pm 0,27

Примечание: СО — стандартное отклонение.
Note: SD — Standard Deviation.

с момента начала работы на предприятии) представлены в таблице 2.

Наборы данных для исследования. На первом этапе исследования на основании медико-дозиметрической базы данных «Клиника» [17, 18] были идентифицированы все анализы периферической крови с показателями, выходящими за пределы физиологической нормы. В дальнейшем эти анализы были сопоставлены с индивидуальными историями болезни, в результате чего установлено, что все показатели периферической крови соответствовали истинному состоянию здоровья каждого конкретного работника и все изменения в анализах периферической крови были обусловлены наличием какой-либо острой или хронической соматической патологии. Были определены заболевания, в результате которых могли изменяться показатели красной крови, с целью исключения их влияния на динамику показателей периферической крови в зависимости от дозы внешнего гамма-облучения. В первые 15 лет после начала работы в изучаемой когорте работников такими заболеваниями были:

- туберкулез (коды МКБ-9 [19]: 11–18);
- маточные кровотечения (коды МКБ-9: 626.2, 626.5, 626.6);
- язвенная болезнь с кровотечением (коды МКБ-9: 531.0, 531.2, 531.4, 531.6, 532.0, 532.2, 532.4, 532.6);
- цирроз печени с варикозным расширением вен пищевода (коды МКБ-9: 456.0, 456.2);
- злокачественные новообразования (коды МКБ-9: 140–208);
- болезни крови и кроветворных органов (коды МКБ-9: 280–289);
- желудочно-кишечные кровотечения (коды МКБ-9: 578);

- геморрой (коды МКБ-9: 455.2, 455.5);
- кровотечение неуточненное (коды МКБ-9: 459.0);
- осложнения беременности и родов (коды МКБ-9: 633, 634, 635, 636, 637, 638, 640, 641, 665, 666).

1500 работников с перечисленными выше заболеваниями были исключены из исследования. Также из исследования были исключены 486 работников изучаемой когорты, у которых была полностью или частично утрачена медицинская документация. Таким образом, в настоящее исследование включены 5405 работников, у которых имелись данные гематологических обследований в первые 15 лет после начала работы на ПО «Маяк».

В настоящем исследовании «предварительным медицинским осмотром» считали обследование до начала работы на основном заводе или после начала работы, но до начала внешнего гамма-облучения и/или внутреннего альфа-облучения. Данные гематологического обследования в период «предварительного медицинского осмотра», зарегистрированные в медицинских картах, были у 4206 (77,8%) из 5405 работников. Не имели данных гематологического обследования, соответствующих критериям «предварительного медицинского осмотра», 1199 (22,2%) работников. Всего в первые 15 лет наблюдения зарегистрировано 157 045 общих анализов крови, в среднем $29,06 \pm 21,69$ на человека за весь период наблюдения или $3,30 \pm 2,99$ на человека в год. Следует отметить, что 555 анализов, в том числе 18 «предварительных», совпадали с периодом беременности у женщин-работниц ПО «Маяк», поэтому эти анализы были исключены из анализа. Таким образом, в настоящее исследование включены 156 490 общих анализов периферической крови, в том числе 4188 анализов, выполненных при проведении предварительного медицинского обследования.

Статистический анализ. Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета прикладных программ Statistica 10. Для сравнения средних значений в случаях нормального распределения был использован *t*-критерий Стьюдента. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$ [25]. Для анализа динамики изучаемых показателей в зависимости от дозы внешнего гамма-облучения использовали модель множественной линейной регрессии по двум временным рядам с включением в нее как отдельной независимой переменной фактора времени *t*. Модель имела вид:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot D_\gamma + \beta_2 \cdot t + \varepsilon,$$

где *y* — изучаемый показатель, D_γ — годовая поглощенная в костном мозге доза внешнего гамма-излучения.

Результаты

На первом этапе был проведен анализ исходного уровня количества эритроцитов и концентрации гемоглобина на «предварительном медицинском осмотре», результаты которого представлены в таблице 3.

Таблица 3. Показатели красной крови на момент «предварительного медицинского осмотра» в зависимости от пола
Table 3. Blood count indices at the pre-employment health check-up, by sex

Показатель/Index	Мужчины/Males		Женщины/Females	
	Кол-во анализов Number of tests	Среднее значение ± СО (мин–макс) Mean ± SD (min–max)	Кол-во анализов Number of tests	Среднее значение ± СО (мин–макс) Mean ± SD (min–max)
Количество эритроцитов, ×10 ¹² /л Number of red blood cells, × 10 ¹² /L	3373	4,62 ± 0,39 (3,20–6,20)	758	4,21 ± 0,36* (2,60– 5,50)
Концентрация гемоглобина, г/л Hemoglobin concentration, g/L	3367	151,33 ± 10,27 (51,00–189,00)	754	135,09 ± 9,71* (79,00–183,00)

Примечание: знаком * отмечены статически значимые различия между мужчинами и женщинами, СО — стандартное отклонение.
Note: * denotes statistically significant differences between males and females, SD — Standard Deviation.

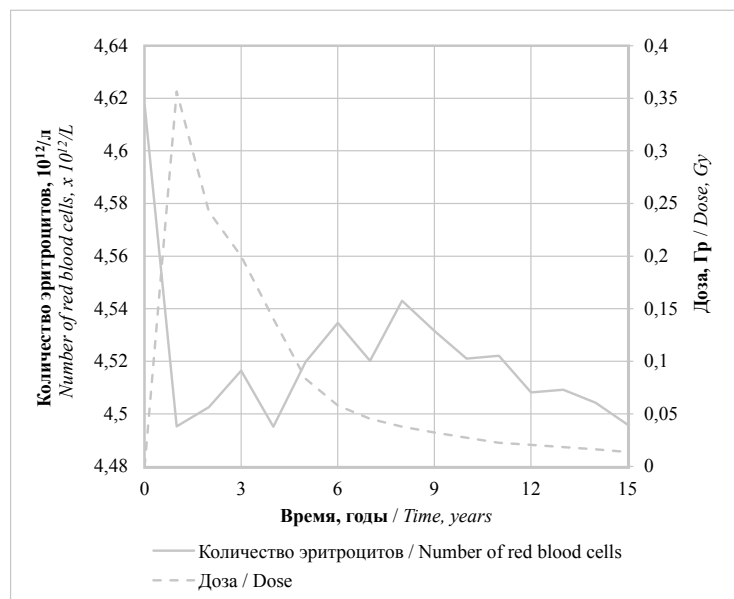


Рисунок 1. Динамика количества эритроцитов у мужчин изучаемой когорты за весь период наблюдения
Figure 1. Trend in red blood count levels in males of the analyzed cohort throughout the follow-up period

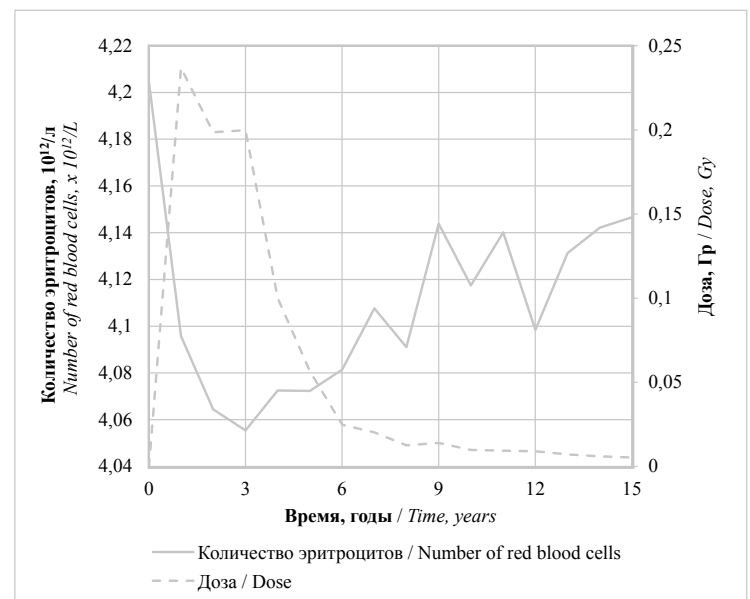


Рисунок 2. Динамика количества эритроцитов у женщин изучаемой когорты за весь период наблюдения
Figure 2. Trend in red blood cell levels in females of the analyzed cohort throughout the follow-up period

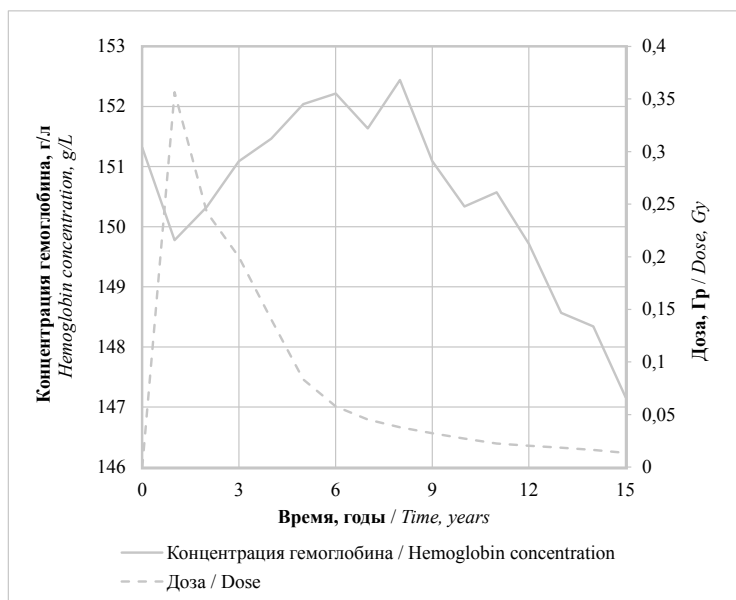


Рисунок 3. Динамика концентрации гемоглобина у мужчин изучаемой когорты за весь период наблюдения

Figure 3. Trend in hemoglobin concentration in males of the analyzed cohort throughout the follow-up period

эритроцитов и концентрация гемоглобина в периферической крови резко снижались в первые годы после начала контакта с источниками ионизирующего излучения, когда у работников изучаемой когорты были зарегистрированы наиболее высокие годовые поглощенные в костном мозге дозы гамма-излучения, как у мужчин, так и у женщин, с последующим постепенным восстановлением. Различия были статистически значимыми по сравнению с данными предварительного медицинского осмотра. Несмотря на то что количество эритроцитов оставалось в пределах границ физиологической нормы в течение всего периода наблюдения, не было зарегистрировано полного восстановления до уровня предварительного медицинского осмотра. Концентрация гемоглобина также не выходила за пределы границ физиологической нормы в течение всего периода наблюдения, однако после периода восстановления постепенно снижалась к концу периода наблюдения по сравнению с концентрацией, зарегистрированной при предварительном медицинском осмотре.

Анализ зависимости изучаемых показателей от дозы внешнего гамма-облучения (табл. 4) выявил статистически значимую зависимость количества эритроцитов и концентрации гемоглобина от дозы облучения ($p < 0,05$).

Обсуждение

Костный мозг является иерархически структурированной самообновляющейся тканью, стимулируемой небольшим количеством стволовых клеток и ранних предшественников, чьей основной функцией является асимметричное самообновление после редких циклов деления или коммитирование к дифференцировке до определенных линий клеток крови. Стволовые

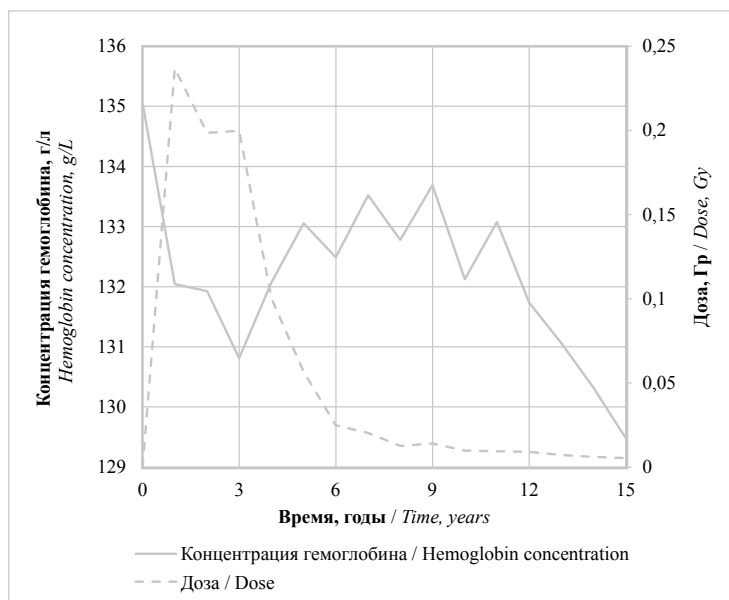


Рисунок 4. Динамика концентрации гемоглобина у женщин изучаемой когорты за весь период наблюдения

Figure 4. Trend in hemoglobin concentration in females of the analyzed cohort throughout the follow-up period

клетки и очень ранние предшественники представляют собой первый из трех основных функциональных компартментов костного мозга, тогда как второй и третий компартменты включают пролиферирующие коммитированные предшественники и непролиферирующие созревающие клетки и клеточные резервы. Специфическое окружение стволовой клетки и взаимодействие различных гуморальных и клеточных факторов играют важнейшую роль в ее выживании и дифференцировке [26–29].

Эритроциты — безъядерные клетки, имеющие форму двояковогнутого диска, которая поддерживается благодаря стабилизирующему белку мембраны — спектрину. Основная функция эритроцитов — транспорт дыхательных газов. Безъядерность эритроцитов, и их форма обеспечивают им наиболее оптимальные свойства в процессе газообмена, поддержании деформабельности и осмотической резистентности. Зрелые эритроциты, циркулирующие в кровотоке, благодаря отсутствию ядра устойчивы к воздействию ионизирующего излучения. Основной мишенью для ионизирующего излучения в системе кроветворения служат стволовые клетки и клетки-предшественницы костного мозга [1].

Система кроветворения высокочувствительна к острому облучению с высокой мощностью дозы [2–6]. В то же время данные о влиянии хронического облучения на отдельные показатели системы кроветворения ограничены. Настоящее исследование посвящено изучению влияния профессионального хронического облучения на систему кроветворения у работников предприятий атомной промышленности. На данном этапе исследования проанализирована связь между внешним гамма-облучением и показателями перифе-

Таблица 4. Зависимость показателей красной крови от годовой поглощенной в костном мозге дозы внешнего гамма-излучения
Table 4. Blood count indices in relation to the annual bone marrow absorbed gamma-ray dose from external exposure

Показатель/ Index	Параметры модели/Model parameters								
	Свободный член Free term		$D_{\gamma, Гр}^a$ $D_{\gamma, Gy}^a$		Время, годы Time, years		R^b	R^{2b}	p-value ^c
	$\beta_0 \pm SE^a$	p-value ^e	$\beta_1 \pm SE^a$	p-value ^e	$\beta_2 \pm SE^a$	p-value ^e			
Мужчины/Males									
Количество эритроцитов, $\times 10^{12}/л$ Number of red blood cells, $\times 10^{12}/L$	4,596 ± 0,011	<0,001	-0,315 ± 0,047	<0,001	-0,007 ± 0,001	<0,001	0,90	0,81	<0,001
Концентрация гемоглобина, г/л Hemoglobin concentration, g/L	153,465 ± 0,848	<0,001	-8,175 ± 3,613	0,041	-0,301 ± 0,077	0,002	0,74	0,55	0,006
Женщины/Females									
Количество эритроцитов, $\times 10^{12}/л$ Number of red blood cells, $\times 10^{12}/L$	4,141 ± 0,025	<0,001	-0,350 ± 0,140	0,027	-0,001 ± 0,002	0,567	0,62	0,39	0,041
Концентрация гемоглобина, г/л Hemoglobin concentration, g/L	135,561 ± 0,562	<0,001	-15,803 ± 3,114	<0,001	-0,328 ± 0,053	<0,001	0,87	0,75	<0,001

Примечание: ^a D_{γ} — годовая поглощенная в костном мозге доза внешнего гамма-излучения, ^b R — коэффициент множественной корреляции, ^c R^2 — коэффициент детерминации, ^d p-value — статистическая значимость модели, ^e SE — стандартная ошибка коэффициента модели, ^f p-value — статистическая значимость коэффициента модели.

Notes: ^a D_{γ} — denotes the annual bone marrow absorbed gamma-ray dose from external exposure, ^b R — denotes the coefficient of multiple correlation; ^c R^2 — denotes the determination coefficient, ^d p-value — denotes the statistical significance of the model, ^e SE — denotes the standard error of the model coefficient, ^f p-value — denotes the statistical significance of a model's coefficient.

рической крови у работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению.

Установлено, что среднее количество эритроцитов и концентрация гемоглобина в периферической крови при предварительном медицинском осмотре у работников ПО «Маяк», поступивших на работу на один из основных заводов в период 1948–1952 гг., находились в пределах границ физиологической нормы; при этом количество эритроцитов и концентрация гемоглобина были статистически ниже у женщин по сравнению с мужчинами. Не выявлено значимых отклонений количества эритроцитов и концентрации гемоглобина от границ физиологической нормы в первые 5 лет работы на основном производстве у работников, подвергшихся хроническому профессиональному облучению. Тем не менее в первые 5 лет работы на ПО «Маяк» средние показатели эритроцитов и гемоглобина были статистически значимо ниже по сравнению с «входным медицинским осмотром».

Полученные данные совпадают с результатами клинических исследований, посвященных изучению влияния хронического облучения на гемопоэз. В исследовании [30], посвященном изучению динамики количества клеточных элементов периферической крови у жителей прибрежных сел реки Течи, подвергшихся комбинированному (внешнему и внутреннему) облучению, было отмечено значимое снижение среднего количества эритроцитов в период 1951–1956 гг. по сравнению с контрольной группой необлученных жителей. Средние значения количества эритроцитов у лиц когорты реки Течи были ниже соответствующих значений у работников ПО «Маяк». В то же время

в более ранних исследованиях персонала ПО «Маяк» не отмечалось снижения количества клеток крови при мощности дозы менее 0,25 Гр/год [31]. В недавних исследованиях [32, 33] было показано влияние профессионального хронического облучения на количество эритроцитов и концентрацию гемоглобина в периферической крови у медицинских работников и работников промышленных предприятий.

В ранних исследованиях А.К. Гуськовой и соавт. [34, 35], основанных на результатах наблюдения за группой лиц, обслуживающих экспериментальные реакторы, при сроках наблюдения до 3–7 лет не было выявлено каких-либо отличий от контроля в количестве эритроцитов, ретикулоцитов, СОЭ и содержании гемоглобина. В то же время дозы внешнего гамма-облучения в этой группе были близки к предельно допустимым для профессионального воздействия.

Настоящее ретроспективное исследование является первым этапом изучения влияния ионизирующего излучения на систему кроветворения при профессиональном хроническом облучении. Исследование носит клинко-эпидемиологический характер, и на этом этапе целью исследования является изучение изменения показателей периферической крови в «период максимального радиационного воздействия». Полученные результаты не позволяют в полной мере судить о предполагаемых патогенетических механизмах. Ранее доказано, что система кроветворения высокочувствительна к влиянию острого облучения, однако данных о влиянии хронического облучения на систему кроветворения пока недостаточно. На следующих этапах исследования планируется изучение зависимости других показателей

периферической крови (количество тромбоцитов и лейкоцитов) от суммарной дозы и мощности внешнего гамма-облучения и оценка дозового порога развития тканевых реакций в системе кроветворения.

Таким образом, в результате настоящего исследования показана динамика показателей периферической крови в первые 15 лет работы на ПО «Маяк» и статисти-

чески значимое снижение в первые 5 лет количества эритроцитов и концентрации гемоглобина в периферической крови по сравнению с «предварительным медицинским осмотром» как у мужчин, так и у женщин. Также выявлена статистически значимая зависимость количества эритроцитов и концентрации гемоглобина от дозы внешнего гамма-облучения.

Литература

1. Clement C.H., Stewart F.A., Akleyev A.V., et al. ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs — threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann ICRP*. 2012;41(1–2):1–322. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.02.001.
2. Akleyev A.V., Kossenko M.M., Startsev N.V. Techa River population: long term medical follow-up. *Br J Radiol*. 2002;(Suppl. 26):32–40.
3. Gidali J. Effects of protracted and chronic irradiation on the haemopoietic system in mouse. *Exp Eye Res*. 2002;(69):219–35.
4. Guskova A.K., Gusev L.A., Okladnikova N.D. Russian concept of chronic radiation disease in man. *Br J Radiol*. 2002;(Suppl. 26):19–23.
5. Okladnikova N.D., Kudryavtseva T.I., Belyaeva Z.D. Плутониевый пневмосклероз, итоги многолетнего медицинского наблюдения. *Вопросы радиационной безопасности*. 2000;1:42–9.
6. Seed T.M., Fritz T.E., Tolle D.V., Jackson W.E. 3rd. Hematopoietic responses under protracted exposures to low daily dose gamma irradiation. *Adv Sp Res*. 2002;30(4):945–55. DOI: 10.1016/s0273-1177(02)00159-x
7. Пестерникова В.С., Okladnikova N.D. Оценка показателей морфологического состава периферической крови у больных хронической лучевой болезнью за 40 лет наблюдения. *Вопросы радиационной безопасности*. 2003;3:60–6.
8. Пестерникова В.С., Okladnikova N.D. Оценка костномозгового кроветворения у больных хронической лучевой болезнью через 40 лет наблюдения. *Вопросы радиационной безопасности*. 2004;4:41–5.
9. Okladnikova N.D., Guskova A.K. Клиническая токсикология соединений плутония и америция. *Радиационная медицина. Руководство для врачей-исследователей и организаторов здравоохранения. Том 2. Радиационные поражения человека*. М.: ИздАТ, 2001:328–69.
10. Akleyev A.V., Vermeyeva G.A., Silkina L.A., Vozilova A.V. Long-term haemopoiesis and immunity status after chronic radiation exposure of red bone marrow in humans. *Centr Eur J Occup Environ Med*. 1999;5(2):113–29.
11. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча. Под ред. Аклеева А.В., Киселева М.Ф. Челябинск: Фрегат, 2002:531.
12. Аклеев А.В., Варфоломеева Т.А. Состояние гемопоэза в условиях многолетнего облучения костного мозга у жителей прибрежных сел р. Теча. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2007;47(3):307–21.
13. Колмогорова Л.А. Состояние эритрона в условиях длительного фракционного облучения. *Вопросы радиобиологии и биологического действия цитостатических препаратов*. Под ред. профессора Е.Д. Гольдберга. Томск: б. и., 1976:127–32.
14. Кайзер С.А., Молчанов М.Г. Изменение гемопоэза и у белых крыс при однократном и хроническом воздействии гамма-лучей. *Вопросы радиобиологии*. Томск: б. и., 1968:78–85.
15. Козинец Г.И., Жильев Е.Г., Легеца В.И. и др. Клетки периферической крови ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС после пятилетнего наблюдения. *Гематология и трансфузиология*. 1993;38(9):35–8.

References

1. Clement C.H., Stewart F.A., Akleyev A.V., et al. ICRP publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs — threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Ann ICRP*. 2012;41(1–2):1–322. DOI: 10.1016/j.icrp.2012.02.001.
2. Akleyev A.V., Kossenko M.M., Startsev N.V. Techa River population: long term medical follow-up. *Br J Radiol*. 2002;(Suppl. 26):32–40.
3. Gidali J. Effects of protracted and chronic irradiation on the haemopoietic system in mouse. *Exp Eye Res*. 2002;(69):219–35.
4. Guskova A.K., Gusev L.A., Okladnikova N.D. Russian concept of chronic radiation disease in man. *Br J Radiol*. 2002;(Suppl. 26):19–23.
5. Okladnikova N.D., Kudryavtseva T.I., Belyaeva Z.D. Plutonium pneumosclerosis, conclusions of the continuous medical studies. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti*. 2000;1:42–9 (In Russian).
6. Seed T.M., Fritz T.E., Tolle D.V., Jackson W.E. 3rd. Hematopoietic responses under protracted exposures to low daily dose gamma irradiation. *Adv Sp Res*. 2002;30(4):945–55. DOI: 10.1016/s0273-1177(02)00159-x
7. Pesternikova V.S., Okladnikova N.D. Estimate of indexes of peripheral blood morphological composition among patients with chronic radiation sickness during 40-year observation period. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti*. 2003;3:60–6 (In Russian).
8. Pesternikova V.S., Okladnikova N.D. Assessment of bone marrow hematopoiesis in patients with chronic radiation sickness after 40 years of follow-up. *Voprosy radiacionnoj bezopasnosti*. 2004;4:41–5 (In Russian).
9. Okladnikova N.D., Guskova A.K. Clinical Toxicology of Plutonium and Americium Compounds. *Radiation Medicine. A Manual for Medical Researchers and Health Organizers. Volume 2. Human Radiation Injuries*. Moscow: IzdAT, 2001:328–69 (In Russian).
10. Akleyev A.V., Vermeyeva G.A., Silkina L.A., Vozilova A.V. Long-term haemopoiesis and immunity status after chronic radiation exposure of red bone marrow in humans. *Centr Eur J Occup Environ Med*. 1999;5(2):113–29.
11. Medical, biological and ecological consequences of radioactive contamination of the Techa River. Ed. Akleyev A.V., Kiselev M.F. Chelyabinsk: Fregat, 2002:531 (In Russian).
12. Akleyev A.V., Varfolomeyeva T.A. The State of Hemopoiesis under Conditions of Long-Term Bone Marrow Exposure in Residents of the Techa Riverside Villages. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*. 2007;47(3):307–21 (In Russian).
13. Kolmogorova L.A. The state of the erythron under conditions of prolonged fractional irradiation. *Issues of radiobiology and biological action of cytostatic drugs*. Ed. E.D. Goldberg. Tomsk, 1976:127–32 (In Russian).
14. Kaiser S.A., Molchanov M.G. Changes in hematopoiesis in white rats after single and chronic exposure to gamma rays. *Questions of radiobiology*. Tomsk, 1968:78–85 (In Russian).
15. Kozinets G.I., Zhilyaev E.G., Legeza V.I., et al. Peripheral blood cells of liquidators of the accident at the Chernobyl nuclear power plant after a five-year follow-up. *Hematologiya i transfusiologiya*. 1993;38(9):35–8 (In Russian).

16. Kruglov A. The History of the Soviet Atomic Industry. London: Taylor and Francis, 2002:288.
17. Azizova T.V., Day R.D., Wald N., et al. The "clinic" medical-dosimetric database of Mayak production association workers: structure, characteristics and prospects of utilization. *Health Phys.* 2008;94(5):449–58. DOI: 10.1097/O1.HP.0000300757.00912.a2.
18. Азизова Т.В., Тепляков И.И., Григорьева Е.С. и др. Медико-дозиметрическая база данных «Клиника» работников ПО «Маяк» и их семей. *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 2009;54(5):26–35.
19. МКБ-9. Руководство по кодированию заболеваний, травм и причин смерти. Пересмотр 1975. Женева: ВОЗ, 1980:752.
20. Руководство по клиническим лабораторным исследованиям. Под ред. Л.Г. Смирновой, Е.А. Кост. М.: Медгиз, 1960:963.
21. Лабораторные методы исследования в клинике. Под ред. В.В. Меншикова. М.: Медицина, 1987:368.
22. Соколов В.В., Грибова И.А. Показатели состояния основных систем и органов здорового человека. М., 1977:69–84.
23. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора; 2009:100.
24. Vasilenko E.K., Khokhryakov V.F., Miller S.C., et al. Mayak worker dosimetry study: an overview. *Health Phys.* 2007;93(3):190–206. DOI: 10.1097/O1.HP.0000266071.431370e.
25. Zar J.H. *Biostatistical Analysis.* New Jersey: Prentice Hall, 1999:663.
26. Arai F., Hirao A., Ohmura M., et al. Tie2/angiopoietin-1 signaling regulates hematopoietic stem cell quiescence in the bone marrow niche. *Cell.* 2004;118(2):149–61. DOI: 10.1016/j.cell.2004.07.004.
27. Zhu J., Emerson S.G. A new bone to pick: osteoblasts and the haematopoietic stem-cell niche. *Bioessays.* 2004;26(6):595–9. DOI: 10.1002/bies.20052.
28. Ladi E., Yin X., Chtanova T., Robey E.A. Thymic microenvironments for T cell differentiation and selection. *Nat Immunol.* 2006;7(4):338–43. DOI: 10.1038/ni1323.
29. Scadden D.T. The stem-cell niche as an entity of action. *Nature.* 2006;441(7097):1075–9. DOI: 10.1038/nature04957.
30. Аклейев А.В., Димов Г.П., Варфоломеева Т.А. Состояние кроветворения у жителей прибрежных сел реки Теча в период максимального радиационного воздействия. Сообщение 2. Оценка влияния дозы и мощности дозы облучения красного костного мозга и модифицирующих факторов на частоту цитопений и цитозов. *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2012;52(2):130–42.
31. Okladnikova N.D., Pesternikova V.S., Azizova T.V. Deterministic effects of occupational exposure to chronic radiation. *Br J Radiol.* 2002;Suppl. 26:26–31.
32. Guo J.J., Liu N., Ma Z., et al. Dose-Response Effects of Low-Dose Ionizing Radiation on Blood Parameters in Industrial Irradiation Workers. *Dose Response.* 2022;20(2):15593258221105695. DOI: 10.1177/15593258221105695.
33. Tian X.L., Lu X., Lyu Y.M., et al. Analysis of Red Blood Cells and their Components in Medical Workers with Occupational Exposure to Low-Dose Ionizing Radiation. *Dose Response.* 2022;20(1):15593258221081373. DOI: 10.1177/15593258221081373
34. Гуськова А.К., Денисова Е.А., Моисейцев П.И., Корлякова Е.А. Условия труда и состояние здоровья лиц, работающих на реакторах. *Медицинская радиология.* 1966;11(8):37–42.
35. Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Оценка состояния здоровья и принципы трудоустройства лиц, подвергшихся воздействию ионизирующих излучений. *Медицинская радиология.* 1968;13(5):3–9.
16. Kruglov A. The History of the Soviet Atomic Industry. London: Taylor and Francis, 2002:288.
17. Azizova T.V., Day R.D., Wald N., et al. The "clinic" medical-dosimetric database of Mayak production association workers: structure, characteristics and prospects of utilization. *Health Phys.* 2008;94(5):449–58. DOI: 10.1097/O1.HP.0000300757.00912.a2.
18. Azizova T.V., Teplyakov I.I., Grigoryeva E.S., et al. "Clinic" medical dosimetric database for mayak pa personnel and its families. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'.* 2009;54(5):26–35 (In Russian).
19. Guide to the International Statistical Classification of Diseases, Injuries and Causes of Death. Revision 1975. Geneva: WHO, 1980:752 (In Russian).
20. Manual of clinical laboratory research. Ed. L.G. Smirnova, E.A. Kost. Moscow: Medgiz, 1960:963 (In Russian).
21. Laboratory research methods in the clinic. Ed. V.V. Menshikov. Moscow: Meditsina, 1987:368 (In Russian).
22. Sokolov V.V., Gribova I.A. Indicators of the state of the main systems and organs of a healthy person. Moscow, 1977:69–84 (In Russian).
23. Radiation safety standards (NRB-99/2009): Sanitary and epidemiological rules and regulations. Moscow: Federal'nyj centr gigieny i jepidemiologii Rospotrebnadzora; 2009:100 (In Russian).
24. Vasilenko E.K., Khokhryakov V.F., Miller S.C., et al. Mayak worker dosimetry study: an overview. *Health Phys.* 2007;93(3):190–206. DOI: 10.1097/O1.HP.0000266071.431370e.
25. Zar J.H. *Biostatistical Analysis.* New Jersey: Prentice Hall, 1999:663.
26. Arai F., Hirao A., Ohmura M., et al. Tie2/angiopoietin-1 signaling regulates hematopoietic stem cell quiescence in the bone marrow niche. *Cell.* 2004;118(2):149–61. DOI: 10.1016/j.cell.2004.07.004.
27. Zhu J., Emerson S.G. A new bone to pick: osteoblasts and the haematopoietic stem-cell niche. *Bioessays.* 2004;26(6):595–9. DOI: 10.1002/bies.20052.
28. Ladi E., Yin X., Chtanova T., Robey E.A. Thymic microenvironments for T cell differentiation and selection. *Nat Immunol.* 2006;7(4):338–43. DOI: 10.1038/ni1323.
29. Scadden D.T. The stem-cell niche as an entity of action. *Nature.* 2006;441(7097):1075–9. DOI: 10.1038/nature04957.
30. Akleyev A.V., Dimov G.P., Varfolomeyeva T.A. Status of hemapoiesis in residents of the Techa riverside villages in the period of maximum radiation exposure. Report 2. Influence of exposure dose and dose rate of red bone marrow as well as modifying factors on the frequency of cytopenia and cytosis. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya.* 2012;52(2):130–42 (In Russian).
31. Okladnikova N.D., Pesternikova V.S., Azizova T.V. Deterministic effects of occupational exposure to chronic radiation. *Br J Radiol.* 2002;Suppl. 26:26–31.
32. Guo J.J., Liu N., Ma Z., Gong Z.J., et al. Liang Y.L., Cheng Q., Zhong X.G., Yao Z.J. Dose-Response Effects of Low-Dose Ionizing Radiation on Blood Parameters in Industrial Irradiation Workers. *Dose Response.* 2022;20(2):15593258221105695. DOI: 10.1177/15593258221105695.
33. Tian X.L., Lu X., Lyu Y.M., et al. Analysis of Red Blood Cells and their Components in Medical Workers with Occupational Exposure to Low-Dose Ionizing Radiation. *Dose Response.* 2022;20(1):15593258221081373. DOI: 10.1177/15593258221081373.
34. Guskova A.K., Denisova E.A., Moiseitsev P.I., Korlyakova E.A. Working conditions and health status of persons working at reactors. *Meditsinskaya radiologiya.* 1966;11(8):37–42 (In Russian).
35. Guskova A.K., Baysogolov G.D. Assessment of the state of health and principles of employment of persons exposed to ionizing radiation. *Meditsinskaya radiologiya.* 1968;13(5):3–9 (In Russian).

Информация об авторах

Брагин Евгений Викторович, кандидат медицинских наук, научный сотрудник ФГБУН «Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики» ФМБА России,
e-mail: clinic@subi.su
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0410-5048>

Григорьева Евгения Сергеевна, начальник научно-исследовательского отдела медико-биологической и демографической аналитики — научный сотрудник ФГБУН «Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики» ФМБА России,
e-mail: clinic@subi.su
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1806-9922>

Азизова Тамара Васильевна*, кандидат медицинских наук, начальник научно-исследовательского отдела радиационной эпидемиологии — главный научный сотрудник ФГБУН «Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики» ФМБА России,
e-mail: clinic@subi.su
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6954-2674>

* Автор, ответственный за переписку

Поступила: 18.05.2025

Принята к печати: 13.11.2025

Information about the authors

Evgeniy V. Bragin, Cand. Sci. (Med.), Researcher, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency,
e-mail: clinic@subi.su
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0410-5048>

Evgeniya S. Grigoryeva, Head of the Research Department of Medical, Biological and Demographic Analytics — Researcher, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency,
e-mail: clinic@subi.su
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1806-9922>

Tamara V. Azizova*, Cand. Sci. (Med.), Head of the Research Department of Radiation Epidemiology — Chief Researcher, Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of the Federal Medical Biological Agency,
e-mail: clinic@subi.su
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6954-2674>

* Corresponding author

Received 18 May 2025

Accepted 13 Nov 2025