

Т.В. Вишнеvская¹, Е.В. Брониковская¹, М.Ю. Цыпленкова¹,
Д.С. Исубакова¹, О.С. Цымбал¹, И.В. Мильто^{1,2}, Р.М. Тахауов^{1,2}

ЗНАЧЕНИЕ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ ХРОМОСОМНЫХ АБЕРРАЦИЙ ЛИМФОЦИТОВ КРОВИ В ФОРМИРОВАНИИ ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫХ НОВООБРАЗОВАНИЙ У РАБОТНИКОВ ОБЪЕКТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

¹ Северский биофизический научный центр ФМБА России, Северск

² Сибирский государственный медицинский университет Минздрава России, Томск

Контактное лицо: Татьяна Валерьевна Вишнеvская, e-mail: mail@sbrc.seversk.ru, vishnevskaya_seversk@mail.ru

РЕФЕРАТ

Цель: Провести сравнительный анализ частоты хромосомных aberrаций (ХА) лимфоцитов крови у условно здоровых работников объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) и работников ОИАЭ, имеющих злокачественные новообразования (ЗНО), подвергавшихся в ходе своей профессиональной деятельности воздействию внешнего облучения γ -излучением.

Материал и методы: Материалом для исследования служила венозная кровь работников ОИАЭ, подвергавшихся воздействию ионизирующего излучения (ИИ) в ходе выполнения своих трудовых обязанностей (внешнее облучение γ -излучением). В исследование включено 58 мужчин – работников ОИАЭ, которые были разделены на две группы: группа I ($n = 42$; работники ОИАЭ, не имеющие в анамнезе на момент забора крови ЗНО) и группа II ($n = 16$; работники ОИАЭ, имеющие ЗНО). При формировании выборки исключали работников с внутренним и/или сочетанным облучением. Цитогенетический анализ проводили на культивированных лимфоцитах крови после рутинной окраски красителем Гимзы.

Результаты: При сравнении частоты ХА в лимфоцитах крови условно здоровых работников ОИАЭ и работников ОИАЭ, имеющих ЗНО, выявлено повышение частоты хромосомных фрагментов ($p = 0,0207$) у работников ОИАЭ, имеющих ЗНО. Частоты других изученных типов ХА (хроматидные фрагменты, дицентрические и кольцевые хромосомы) не различаются между группами.

Обсуждение: Цитогенетический анализ ХА в лимфоцитах крови является надёжным и высокочувствительным методом оценки воздействия ИИ на организм. Увеличение частоты ХА указывает на повреждение структуры ДНК, что преимущественно обусловлено снижением способности клеток к её репарации у работников ОИАЭ, имеющих ЗНО.

Заключение: Учитывая, что ИИ относится к вредным производственным факторам, и что основным патогенетическим механизмом воздействия на клетку является повреждение ДНК, работники ОИАЭ, подвергающиеся воздействию ИИ в ходе профессиональной деятельности, должны быть отнесены к группе повышенного риска возникновения ЗНО. В этой связи необходимо тщательное медицинское наблюдение за работниками ОИАЭ, подвергающимися воздействию техногенного ИИ в ходе профессиональной деятельности, для профилактики и своевременного выявления ЗНО. На основании полученных результатов целесообразно рекомендовать проведение рутинного цитогенетического исследования лимфоцитов крови работников ОИАЭ в ходе предварительных и периодических медицинских осмотров для формирования групп повышенного риска развития ЗНО с целью проведения профилактических мероприятий и своевременной диагностики.

Ключевые слова: хромосомные aberrации, профессиональное облучение, злокачественные новообразования, цитогенетическое исследование, лимфоциты крови

Для цитирования: Вишнеvская Т.В., Брониковская Е.В., Цыпленкова М.Ю., Исубакова Д.С., Цымбал О.С., Мильто И.В., Тахауов Р.М. Значение повышенной частоты хромосомных aberrаций лимфоцитов крови в формировании злокачественных новообразований у работников объекта использования атомной энергии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 6. С. 108–114. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-108-114

T.V. Vishnevskaya¹, E.V. Bronikovskaya¹, M.Yu. Tsyplenkova¹,
D.S. Isubakova¹, O.S. Tsybal¹, I.V. Milto^{1,2}, R.M. Takhaouov^{1,2}

The Importance of an Increased Frequency of Chromosomal Aberrations of Blood Lymphocytes in the Formation of Malignant Neoplasms in Workers of an Atomic Energy Facility

¹ Seversk Biophysical Research Center, Seversk, Russia

² Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

Contact person: Tatyana V. Vishnevskaya, e-mail: mail@sbrc.seversk.ru, vishnevskaya_seversk@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: To carry out a comparative analysis of the frequency of chromosomal aberrations of blood lymphocytes in conditionally healthy workers of an atomic energy facility and workers with malignant neoplasms who were exposed to external gamma radiation in the course of their professional activities.

Material and methods: The material for the study was the venous blood of workers exposed to ionizing radiation during the performance of their work duties (external exposure to gamma radiation). The study included 58 male production workers, who were divided into two

groups: group I ($n = 42$, workers with no history of hypertension at the time of blood collection) and group II ($n = 16$ workers with malignant neoplasm). When forming the sample, workers with internal and/or combined radiation were excluded. Cytogenetic analysis was performed on cultured blood lymphocytes after routine staining with Giemsa dye.

Results: When comparing the frequency of chromosomal aberrations in blood lymphocytes of conditionally healthy workers of an ionizing radiation facility and workers of an ionizing radiation facility with malignant neoplasms, an increase in the frequency of chromosomal fragments ($p = 0.0207$) was revealed in workers of an ionizing radiation facility with malignant neoplasms. The frequencies of other types of chromosomal aberrations studied (chromatid fragments, dicentric and ring chromosomes) do not differ between the groups.

Discussion: Cytogenetic analysis of chromosomal aberrations in blood cells is a reliable and highly sensitive method for assessing radiation exposure. Chromosomal abnormalities serve as a biological marker of ionizing radiation. An increase in the frequency of chromosomal aberrations may indicate damage to the DNA structure, which is mainly due to a decrease in the ability of cells to repair it in workers of an atomic energy facility with malignant neoplasms.

Conclusion: Considering that ionizing radiation is one of the harmful production factors of an atomic energy facility, the main pathogenetic mechanism of action on a cell is DNA damage, employees of an atomic energy facility who are exposed in the course of their professional activities belong to the group of increased risk of malignant neoplasms. In this regard, careful medical supervision of employees of an atomic energy facility who are exposed to man-made ionizing radiation during their professional activities is necessary for the prevention and timely detection of malignant neoplasms. Based on the results obtained, it is advisable to recommend routine cytogenetic blood testing of employees of an atomic energy facility during preliminary and periodic medical examinations to form groups at increased risk of developing malignant neoplasms.

Keywords: *chromosomal aberrations, professional exposure, malignant neoplasms, cytogenetic study, blood lymphocytes*

For citation: Vishnevskaya TV, Bronikovskaya EV, Tsyplenkova MYu, Isubakova DS, Tsymbal OS, Milto IV, Takhauov RM. The Importance of an Increased Frequency of Chromosomal Aberrations of Blood Lymphocytes in the Formation of Malignant Neoplasms in Workers of an Atomic Energy Facility. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2025;70(6):108–114. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-108-114

Введение

Наиболее актуальной проблемой современной радиобиологии является оценка воздействия ИИ на организм человека, в т. ч. техногенного профессионального облучения, оценка его повреждающего действия и прогнозирование возможных последствий.

ИИ нашло применение в металлургии (например, ускорители заряженных частиц, радиоизотопные приборы и пр.), в строительной отрасли, в химической, лёгкой, пищевой промышленности, в геологии, сельском хозяйстве и медицине. В сельском хозяйстве ИИ используется в целях стимуляции роста, развития и выявления новых свойств у растений (скороспелость, урожайность, засухо- и зимостойкость) [1–3]. В медицине и биологии применяются ускорители заряженных частиц, рентгеновские и γ -аппараты, γ - и β -источники ИИ. Благодаря широкому распространению ИИ в медицине и фармакологии появилась возможность лечения и диагностирования заболеваний (например, ЗНО, болезни системы кровообращения и пр.) на более ранних стадиях, что значительно уменьшает их неблагоприятные последствия, в т. ч. смертность [4].

Согласно данным экспертов НКДАР ООН, человек получает в среднем около 3,6 мЗв/год за счёт естественного радиационного фона [5–7].

В рамках масштабного исследования Кормановской Т.А. совместно с коллегами [8] была изучена радиационная обстановка в шести районах восточной части Оренбургской области. Охват составил 37 населённых пунктов, где ранее были зафиксированы повышенные концентрации природных радионуклидов в питьевой воде из подземных источников. Исследование включало измерение концентрации радона в помещениях жилых и общественных зданий, а также оценку мощности дозы γ -излучения внутри зданий и на прилегающих территориях. Результаты показали, что среднегодовая эквивалентная объёмная активность радона в воздухе превысила установленный гигиенический порог в 200 Бк/м³ для эксплуатируемых строений в 23 жилых населённых пунктах и 25 общественных. Наивысшие значения были зарегистрированы в отдельных домах в посёлке Нововинницкое (1242 Бк/м³), сёлах Брацлавка (987 Бк/м³) и Аниховка (942 Бк/м³) Адамовского района. В общественных зда-

ниях максимальные показатели зафиксированы в селе Кваркено (2291 Бк/м³), селе Карабутак (1114 Бк/м³) и посёлке Нововинницкое (923 Бк/м³).

Подобное исследование проводили и в Брянской области [9]. Уровень радиационного фона в Брянской области формируется под воздействием нескольких факторов: ИИ вследствие работы предприятий, использующих источники ИИ в рамках допустимых норм, ИИ от естественных источников ИИ, присутствующих в окружающей среде (например, космическое излучение, радиоактивные вещества в почве и горных породах), медицинские процедуры с применением ИИ (рентген, радиотерапия и др.), а также последствий радиоактивного загрязнения территории Брянской области в результате аварии на Чернобыльской АЭС. При изучении распределения дозовой нагрузки вследствие производственного техногенного облучения ИИ, выявили, что среднегодовые дозы облучения персонала ОИАЭ в 2022 г. существенно не изменились (0,72 мЗв/год), в сравнении с 2021 г. (0,66 мЗв/год). В 2022 г. в Брянской области не было зарегистрировано ни одного случая профессионального заболевания, связанного с воздействием ИИ, а также ни одного случая превышения допустимых уровней облучения персонала, работающего с источниками ИИ. Это важное достижение, свидетельствующее о высоком уровне соблюдения норм радиационной безопасности на предприятиях и в медицинских организациях региона.

Учитывая перспективы расширения атомной отрасли России (введение в эксплуатацию новых предприятий, новых технологий и видов ядерного топлива), возникает необходимость научно обоснованной коррекции норм радиационной безопасности и изучения влияния профессионального техногенного облучения ИИ на здоровье работников ОИАЭ, поскольку это может иметь существенные социально-экономические последствия как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе [10, 11].

Вне зависимости от типа облучения (внешнее или внутреннее) воздействие ИИ на организм вызывает химические, физические и биологические изменения в клетках и тканях. Степень повреждения, вызванного ИИ, определяется совокупной дозой, временем воздействия, видом ИИ, относительной биологической эффек-

тивностью, поражаемым органом и индивидуальными характеристиками организма. Разные ткани обладают различной восприимчивостью к облучению ИИ: особенно чувствительны кроветворная и иммунная системы организма. Высокая чувствительность кроветворной системы к воздействию ИИ является ключевым фактором в развитии лучевой болезни. Основным звеном в патогенезе действия ИИ на клетки является прямое и/или опосредованное повреждение ДНК. С учётом того, что ИИ является канцерогенным фактором, работники ОИАЭ представляют группу повышенного риска развития ЗНО.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) признают цитогенетическое исследование достоверным и надёжным способом оценки степени воздействия ИИ на организм. Ключевыми маркерами влияния ИИ на организм является частота ХА в соматических клетках, кроме этого, частота цитогенетических нарушений используется для оценки индивидуальной предрасположенности к возникновению ЗНО [12].

Цитогенетический анализ ХА признан эффективным и востребованным исследовательским подходом в оценке степени воздействия ИИ, а также его последствий на организм человека.

Цель работы: провести сравнительный анализ частоты ХА лимфоцитов крови условно здоровых работников ОИАЭ и работников ОИАЭ, имеющих ЗНО, подвергавшихся в ходе своей профессиональной деятельности воздействию внешнего облучения γ -излучением.

Материал и методы

В рамках исследования проведён цитогенетический анализ лимфоцитов крови 58 работников ОИАЭ, подвергавшихся воздействию ИИ в ходе выполнения своих трудовых обязанностей. Отбор участников исследования производился согласно определенным требованиям (критерии включения): хроническое профессиональное техногенное общее внешнее облучение ИИ низкой интенсивности (γ -излучение), суммарная доза внешнего облучения 100–500 мЗв. Согласно вышеперечисленным требованиям, все работники ОИАЭ были разделены на две группы: группа I ($n = 42$; условно здоровые мужчины, средний возраст 56 лет, средний стаж работы 29 лет) и группа II ($n = 16$; мужчины-работники, имеющие ЗНО, средний возраст 66 лет, средний стаж работы 35 лет). Для группы II основным критерием отбора было наличие ЗНО (без учёта локализации и стадии). Для выборок вычисляли M – среднее арифметическое и SE – стандартная погрешность среднего арифметического, медиана, $L-R$ – интерквартильный размах. Математическую обработку проводили с использованием программы Statistica 8.0. Детальная характеристика исследуемых групп представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика обследованных групп Characteristics of the surveyed groups

Показатель	Группа I	Группа II
Количество обследованных, чел.	42	16
Возраст, лет	$M \pm SE$ 56,64 \pm 9,75	65,75 \pm 7,93
Стаж работы, лет	$M \pm SE$ 29,38 \pm 9,69	35,25 \pm 8,87
Доза внешнего облучения, мЗв	Медиана ($L-R$) 161,12 (141,87–189,02)	281,45 (185,16–355,30)

Примечание: M – среднее арифметическое; SE – стандартная погрешность среднего арифметического; $L-R$ – интерквартильный размах

Источником информации о работниках ОИАЭ являлся архив медицинской документации и электронная

база данных банка биологического материала СБН Центра ФМБА России, данные об индивидуальных дозах внешнего облучения были получены из отдела охраны труда, ядерной и радиационной безопасности ОИАЭ. От каждого донора было получено добровольное информированное согласие на сбор и исследование биоматериала (венозной крови), а также обработку персональных данных.

Материалом исследования служила венозная кровь, взятая из локтевой вены утром натощак в ходе проведения ежегодного медицинского осмотра работников ОИАЭ. Далее в лаборатории отдела молекулярной и клеточной радиобиологии СБН Центра ФМБА России в стерильных условиях проводили культивирование образцов крови по стандартной методике с использованием питательной среды RPMI-1640 (ПанЭко, Россия) с предварительно добавленным L-глутамином (ПанЭко, Россия) [13].

У каждого работника ОИАЭ изучали не менее 300 метафазных пластинок. Учитывали количество ХА, распознаваемых без карiotипирования: хроматидные фрагменты (одиночные фрагменты и одиночные разрывы хромосомы), хромосомные фрагменты (парные разрывы хромосомы, точечные парные фрагменты), кольцевые и дицентрические хромосомы. Количественно результаты выражали в виде частоты ХА на 100 проанализированных метафазных пластинок. Для каждой группы определена частота обнаружения отдельных типов ХА (в % от общего числа работников ОИАЭ).

Статистический анализ полученных данных проводили в программе Statistica 8.0 (StatSoft, США): для каждого типа цитогенетического нарушения вычисляли медиану и межквартильный интервал, для сравнения количественных показателей между группами был использован непараметрический критерий Манна-Уитни. Статистически значимыми считали значения $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Одним из основных вредных производственных факторов профессионального воздействия на ОИАЭ является ИИ. Чтобы оценить степень воздействия ИИ, по повреждению организма на клеточном уровне, используют цитогенетический анализ. Для большей достоверности и объективности результатов исследований необходимо изучать не только количественные, но и качественные показатели структурной изменчивости хромосом.

Анализ частоты ХА в исследуемых группах представлен в табл. 2.

Таблица 2

Частота ХА в исследуемых группах Frequency of chromosomal abnormalities in the study groups

Тип ХА	Частота ХА на 100 клеток, $M(L-R)$		p -value
	Группа I ($n = 42$)	Группа II ($n = 16$)	
Аберрантные клетки	3,93 (2,33–5,33)	5,91 (3,06–9,24)	0,1092
Хроматидные фрагменты	1,38 (0,33–2,00)	1,86 (0,84–2,68)	0,2043
Хромосомные фрагменты	1,31 (0,33–2,00)	3,23 (0,67–5,19)	0,0207
Кольцевые хромосомы	0,18 (0,00–0,33)	0,13 (0,00–0,00)	0,2226
Дицентрические хромосомы	1,10 (0,00–2,00)	0,57 (0,00–0,89)	0,3500

Примечание: n – число обследованных в группе, p -value – уровень статистической значимости различий по критерию Манна – Уитни; полужирным шрифтом выделены статистически значимые различия показателей ($p < 0,05$)

Согласно данным табл. 2, наблюдается повышение частоты общего количества aberrантных клеток в группе II, т. е. в группе работников, имеющих ЗНО, по сравнению с группой I. Этот результат схож с результатом исследования наших коллег из Института экологии человека СО РАН (г. Кемерово). В своей работе они оценивали частоту ХА у пациентов с раком лёгкого и здоровых доноров, проживающих в Кемеровской области, а также оценивали связь ХА с полиморфизмом генов репарации ДНК. Установлено, что средняя частота aberrантных метафаз в лимфоцитах крови у пациентов с раком лёгкого выше, чем в контрольной группе [14].

Рост частоты ХА свидетельствует о нарушении структуры ДНК, что связано, в первую очередь, со снижением эффективности её репарации в клетках у пациентов, имеющих ЗНО.

Ключевую роль в оценке влияния факторов производственной среды на генетическую стабильность организма человека играют эпидемиологические исследования. Особенно ценным является сопоставление результатов цитогенетического анализа с наличием профессионально обусловленных заболеваний. Жумабекова Г.С. и соавт. проводили исследование по оценке индуцированного мутагенеза у рабочих хризотил-асбестового производства методом учёта ХА [15]. В результате работы выявили, что в лимфоцитах крови работников основной группы исследования частота ХА была в 2,4 раза выше ($2,87 \pm 0,16 \%$), чем у работников контрольной группы ($1,16 \pm 0,21 \%$). Структурные нарушения хромосом в основной группе исследования были представлены aberrациями хромосомного и хроматидного типов.

Из табл. 2 по результатам нашей работы видно, что при сравнении частоты ХА в aberrантных клетках условно здоровых работников ОИАЭ и работников ОИАЭ, имеющих ЗНО, выявлены различия по частоте хромосомных фрагментов ($p = 0,0207$, рис. 1 и рис. 2).

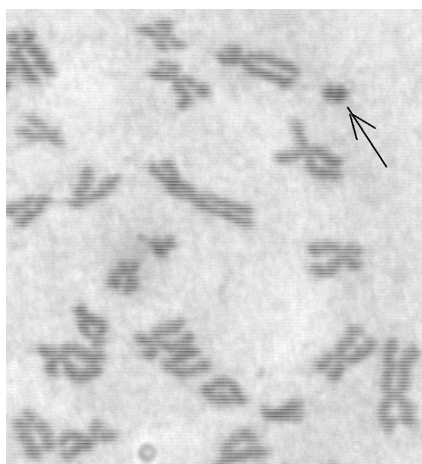


Рис. 1. Абберрация хромосомного типа: парный фрагмент
Fig. 1. Chromosomal aberration: paired fragment

В группе I ($n = 42$) большая часть ХА представлена хромосомными фрагментами – 81 % (34 случая из 42), 76 % – хроматидные фрагменты, 69 % – дицентрические хромосомы и 26 % – кольцевые хромосомы. У 7 работников из группы I были выявлены ХА всех исследуемых типов.

В группе II ($n = 16$) также ХА хромосомного типа имеют по частоте преобладание в отличие от других изученных типов ХА. Во всех образцах работников ОИАЭ группы II наблюдали хромосомные фрагменты (встреча-

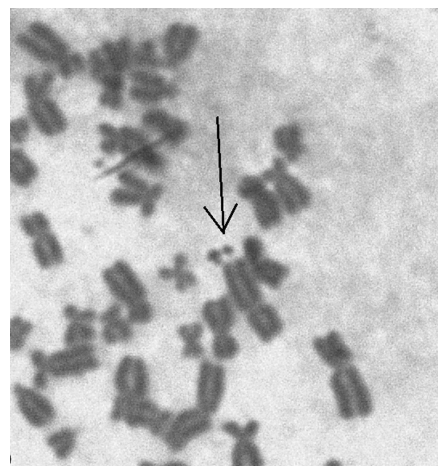


Рис. 2. Абберрация хромосомного типа: парный разрыв хромосомы
Fig. 2. Chromosomal aberrations: paired chromosome break

емость 100 %). У 81 % работников ОИАЭ обнаружены хроматидные фрагменты (13 случаев из 16), у 69 % – дицентрические хромосомы, 19 % – кольцевые хромосомы.

Интересен тот факт, что процентное соотношение дицентрических хромосом (рис. 3) в изучаемых группах оказалось одинаковым.

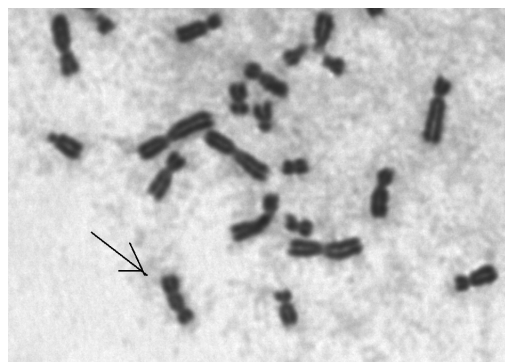


Рис. 3. Метафазная пластинка, содержащая дицентрическую хромосому
Fig. 3. A metaphase plate containing a dicentric chromosome

Отсутствие различий по частоте встречаемости дицентрических хромосом у условно здоровых работников ОИАЭ и работников, имеющих ЗНО, представляет значительный интерес, поскольку этот тип ХА служит индикатором радиационного воздействия и предоставляет возможность верифицировать факт облучения ИИ.

В последние годы существенно возросло количество научных исследований, направленных на совершенствование имеющихся и разработку новых видов биологической дозиметрии, включая использование современных омиксных технологий, в частности, эпигеномная дозиметрия [16].

Поскольку ХА являются важным прогностическим признаком в оценке риска развития ЗНО, цитогенетический анализ широко применяют в диагностике и оценке предрасположенности к ЗНО. В сочетании с рутинной окраской этот метод позволяет выявить нестабильные хромосомные изменения, которые обычно элиминируются в процессе клеточного деления. Стабильные ХА, способные сохраняться в клетке и накапливаться с возрастом, могут быть обнаружены с помощью флуоресцентной гибридизации *in situ* (FISH).

Цитогенетический анализ в комбинации с методом FISH описан в работе Kadlcikova D. et al. [17]. Их работа была направлена на изучение степени хромосомных повреждений у пациентов с ЗНО и в контрольной группе. У пациентов с раком молочной железы наблюдали повышение частоты стабильных ХА – транслокаций и клеток со сложными хромосомными перестройками, в то время как у пациентов с ЗНО органов желудочно-кишечного тракта преобладали нестабильные ХА, а именно дицентрические хромосомы и ацентрические фрагменты.

Опираясь на данные коллег, можно предположить связь между развитием ЗНО и повышенной частотой стабильных ХА у пациентов. Повышенное количество нестабильных ХА, наблюдаемое у пациентов с ЗНО органов желудочно-кишечного тракта, возможно, связано с воздействием диагностического медицинского облучения.

Согласно литературным источникам, метод анализа ХА возможно применять для оценки поглощённых доз ИИ и создания на их основе стратегий лечения людей, которым, вероятно, проводилось фракционное или местное облучение организма ИИ в диагностических или терапевтических целях [18].

Несмотря на то, что ИИ является признанным канцерогенным фактором, мировой опыт и широкое применение регламентированного ИИ подтверждает положительный эффект его использования, например, в диагностике и лечении ЗНО.

В дальнейшем для полноты анализа частоты ХА планируется провести исследование на большей выборке с учётом локализации ЗНО, индивидуальных особенностей доноров, а также вредных привычек (в первую очередь, курения) у исследуемых индивидов.

Заключение

Результаты данной работы по изучению последствий влияния на организм работников ОИАЭ хронического техногенного профессионального облучения ИИ (внешнее облучение γ -излучением) позволят рекомендовать цитогенетический анализ для отбора персонала ОИАЭ на должности, трудовая деятельность на которых связана с воздействием ИИ, а также для совершенствования системы контроля состояния здоровья персонала ОИАЭ в ходе прохождения периодических медицинских осмотров. Увеличение частоты хромосомных фрагментов в лимфоцитах крови работников ОИАЭ, наряду с повышением частоты дицентрических и кольцевых хромосом, следует считать фактором повышенного риска возникновения ЗНО.

Хроническое воздействие профессионального техногенного облучения ИИ (внешнее облучение γ -излучением) в регламентированных дозах сопровождается повышением частоты ХА (хромосомных фрагментов), что может приводить к повышению радиогенного риска развития ЗНО у работников ОИАЭ. В этой связи необходимо более тщательное медицинское наблюдение за работниками ОИАЭ, которые подвергаются долговременному воздействию техногенного ИИ в ходе профессиональной деятельности, для профилактики и своевременного выявления ЗНО. На основании полученных результатов целесообразно рекомендовать проведение рутинного цитогенетического исследования крови работников ОИАЭ в ходе предварительных и периодических медицинских осмотров для формирования групп повышенного риска развития ЗНО.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Горобец М.И., Куликова М.А. Применение ионизирующего излучения в селекции растений // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК: Материалы Международной студенческой научной конференции. Т. 1. Майский, 13–15 марта, 2024. Белгородский ГАУ, 2024. С. 203.
2. Нархова А.А., Вазилов Р.А., Звездакова Т.Н. Оценка морфобиологических свойств пшеницы под действием низкоэнергетического ионизирующего излучения // Физика. Технологии. Инновации: Тезисы докладов X Международной молодёжной научной конференции, посвящённой 120-летию со дня рождения академиков И.В. Курчатова и А.П. Александрова. Екатеринбург, 15–19 мая 2023 г. Екатеринбург: АМБ, 2023. С. 884–885.
3. Гераськин С.А., Бондаренко Е.В., Бондаренко В.С., Волкова П.Ю. Радиобиологические основы использования ионизирующих излучений в агробиотехнологиях // Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Т. 5. / Под ред. Н.И. Санжаровой. Обнинск: Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, 2023. С. 17–33.
4. Кривушин К.Н., Мысева Е.Р. Применение ионизирующего излучения в медицине. Инновационные механизмы управления цифровой и региональной экономикой: Материалы V Международной студенческой научной конференции. Москва, 15–16 июня 2023 г., Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023. С. 378–383.
5. Маренный А.М., Киселев С.М., Семенов С.Ю. О проблеме обеспечения защиты населения России от природных источников ионизирующего излучения. Часть I. Природные источники и их нормирование // Медицина экстремальных ситуаций. 2019. Т. 21. № 3. С. 371–382.
6. Айдинов Г.Т., Правдюкова Е.А., Поливенко В.А., Липатова Е.А. Природные источники ионизирующего излучения. Радон, как наиболее существенная причина облучения населения // Радиационный контроль. Радиохимические методы исследования: Сборник тезисов Научно-практической конференции с международным участием «Радиационный контроль. Радиохимические методы исследования». Санкт-Петербург, 6–8 декабря 2010 г. СПб: Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2010. С. 111.
7. Ramadhani D., Purnami S., Suvifan V.A., Wanandi S.I., Wibowo H., Syaifudin M. Preliminary Study of Chromosome Aberrations Using Giemsa, Two-Colour Fish, and Micronucleus Assays in Lymphocytes of Individuals Living in Elevated Radon Concentration Areas // Radiation Protection Dosimetry. 2023. V. 199. No. 14. P. 1508–1515. doi: 10.1093/rpd/ncac165.
8. Кормановская Т.А., Романович И.К., Вяльцина Н.Е., Гаевой С.В., Бондарь Л.В., Кононенко Д.В., Сапрыкин К.А., Кокоулина Е.С., Балабина Т.А., Королева Н.А. Облучение населения Оренбургской области природными источниками ионизирующего излучения Часть 1: Результаты комплексного радиационного обследования населённых пунктов восточных районов Оренбургской области // Радиационная гигиена. 2023. Т. 16. № 1. С. 6–18. doi: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18.
9. Евсеев Н.Ф., Исаков О.А., Попов С.Н. Обзор материалов ежегодного информационного справочника «Дозы облучения населения Брянской области от различных источников ионизирующего излучения» за 2022 год // Актуальные вопросы радиационной гигиены: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Санкт-Петербург, 10–11 октября 2023 г., Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева. СПб.:

- Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2023. С. 126–129.
10. Проскурякова Н.Л., Симаков А.В., Абрамов Ю.В. Гигиенические аспекты специальной оценки условий труда при работе с источниками ионизирующего излучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 4. № 67. С. 19–23. doi: 10.33266/1024-6177-2022-67-4-19-23.
 11. Вишневецкая Т.В., Цыпленкова М.Ю., Исубакова Д.С., Цымбал О.С., Мильто И.В., Тахауов Р.М. Оценка спектра и частоты хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников объекта использования атомной энергии на протяжении 15 лет трудовой деятельности // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18. № 1. С. 18–26. doi: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-18-26.
 12. Хвостунов И.К., Крылов В.В., Родичев А.А., Шепель Н.Н., Коровчук О.Н., Кочетова Т.Ю. Анализ побочного сочетанного воздействия радиойодной и лучевой терапии у больных раком щитовидной железы // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). 2021. № 4. С. 1–12.
 13. Вишневецкая Т.В., Исубакова Д.С., Цыпленкова М.Ю., Цымбал О.С., Мильто И.В., Тахауов Р.М. Сравнительный ретроспективный анализ результатов цитогенетических исследований работников объекта использования ионизирующего излучения // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69. № 1. С. 61–66. doi: 10.33266/1024-6177-2024-69-1-61-66.
 14. Баканова М.Л., Минина В.И., Савченко Я.А. Ассоциации полиморфных вариантов генов ферментов биотрансформации ксенобиотиков и рака лёгкого у человека // Медицинская генетика. 2012. Т. 11. № 125. С. 13–20.
 15. Жумабекова Г.С., Аманбекова А.У., Ибраева Л.К., Ажиметова Г.Н. Оценка индуцированного мутагенеза у рабочих хризотил-асбестового производства // Медицина труда и промышленная экология. 2014. № 8. С. 18–22.
 16. Цымбал О.С., Исубакова Д.С., Брониковская Е.В., Николаева А.Ф., Сигин В.О., Калинин А.И., Кириллов В.М., Старцева Ж.А., Литвяков Н.В., Мильто И.В., Тахауов Р.М. Оценка степени метилирования ДНК в лимфоцитах после однократного облучения крови *in vitro* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2024. Т. 2. № 64. С. 126–135. doi: 10.31857/S0869803124020021.
 17. Kadlcikova D., Musilova P., Hradská H., Petrovova M., Selingerova I., Vozdova M., Svoboda M., Rubes J. Different Chromosome Damage in Lymphocytes of Newly Diagnosed Gastrointestinal and Breast Cancer Patients // Neoplasma. 2020. V. 67. No. 3. P. 668–676. doi: 10.4149/neo_2020_190604N48.
 18. Lee Y., Kang J.K., Lee Y.H., Yoon H.J., Yang S.S., Kim S.H., Seongjae J., Sunhoo P., Da H.H., Won I.J., Hyung J.Y., Eun K.P., Hyo R.L., Ki M.S. Chromosome Aberration Dynamics in Breast Cancer Patients Treated with Radiotherapy: Implications for Radiation Biodosimetry // Mutation Research/ Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. 2021. No. 872. P. 503419. doi: 10.1016/j.mrgentox.2021.503419.

REFERENCES

1. Gorobets M.I., Kulikova M.A. Use of Ionizing Radiation in Plant Breeding. *Gorinskiye Chteniya. Innovatsionnyye Resheniya dlya APK = Innovative Solutions for the Agro-Industrial Complex: Proceedings of the International Student Scientific Conference*. V.1. Mayskiy, March 13–15, 2024, Belgorod State Agrarian University. Mayskiy, Belgorodskiy Gosudarstvennyy Agrarnyy Universitet Publ., 2024. P. 203 (In Russ.).
2. Narkhova A.A., Vazirov R.A., Zvezdakova T.N. Evaluation of Morphophysiological Properties of Wheat Under the Influence of Low-Energy Ionizing Radiation. *Fizika. Tekhnologii. Innovatsii = Physics. Technologies. Innovations. Abstracts of Reports of the X International Youth Scientific Conference Dedicated to the 120th Anniversary of the Birth of Academicians I.V. Kurchatov and A.P. Alexandrov*. Ekaterinburg, May 15–19, 2023. Ekaterinburg, ABM Publ., 2023. P. 884–885 (In Russ.).
3. Geras'kin S.A., Bondarenko Ye.V., Bondarenko V.S., Volkova P.Yu. Radiobiological Foundations of the Use of Ionizing Radiation in Agrobiotechnology. *Radiatsionnyye Tekhnologii v Sel'skom Khozyaystve i Pishchevoy Promyshlennosti. Trudy VNIIRAE = Radiation Technologies in Agriculture and Food Industry: Proceedings of the VNIIRAE*. Vol. 5. Ed. N.I. Sanzharova. Obninsk, Vserossiyskiy Nauchno-Issledovatel'skiy Institut Radiologii i Agroekologii Publ., 2023. P. 17-33 (In Russ.).
4. Krivushin K.N., Myseva Ye.R. Use of Ionizing Radiation in Medicine. *Innovatsionnyye Mekhanizmy Upravleniya Tsifrovoy i Regional'noy Ekonomikoy = Innovative Mechanisms for Managing the Digital and Regional Economy*. Proceedings of the V International Student Scientific Conference. Moscow, June 15–16, 2023, National Research Nuclear University "MIFI". Moscow, Natsional'nyy Issledovatel'skiy Yadernyy Universitet "MIFI" Publ., 2023. P. 378–383 (In Russ.).
5. Marennyy A.M., Kiselev S.M., Semenov S.Yu. On the Problem of Ensuring Protection of the Population of Russia from Natural Sources of Ionizing Radiation. Part I. Natural Sources and their Regulation. *Meditsina Ekstremal'nykh Situatsiy = Medicine of Extreme Situations*. 2019;21;3:371–382 (In Russ.).
6. Aydinov G.T., Pravdyukova Ye.A., Polivenko V.A., Lipatova Ye.A. Natural Sources of Ionizing Radiation. Radon as the Most Significant Cause of Population Irradiation. *Radiatsionnyy Kontrol'. Radiokhimicheskiye Metody Issledovaniya = Radiation Control. Radiochemical Research Methods. Collection of Abstracts of the Scientific and Practical Conference with International Participation*. St. Petersburg, December 6–8, 2010. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskiy Nauchno-Issledovatel'skiy Institut Radiatsionnoy Gigiyeny Im. Professora P.V. Ramzayeva Publ., 2010. P. 111 (In Russ.).
7. Ramadhani D., Purnami S., Suvifan V.A., Wanandi S.I., Wibowo H., Syaifudin M. Preliminary Study of Chromosome Aberrations Using Giemsa, Two-Colour Fish, and Micronucleus Assays in Lymphocytes of Individuals Living in Elevated Radon Concentration Areas. *Radiation Protection Dosimetry*. 2023;199;14:1508–1515. doi: 10.1093/rpd/ncac165.
8. Kormanovskaya T.A., Romanovich I.K., Vyal'tsina N.Ye., Gayevoy S.V., Bondar' L.V., Kononenko D.V., Saprykin K.A., Kokoulina Ye.S., Balabina T.A., Koroleva N.A. Irradiation of the Population of the Orenburg Region by Natural Sources of Ionizing Radiation Part 1: Results of a Comprehensive Radiation Survey of Populated Areas in the Eastern Districts of the Orenburg Region. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2023;16;1:6–18 (In Russ.). doi: 10.21514/1998-426X-2023-16-1-6-18.
9. Yevseyev N.F., Isakov O.A., Popov S.N. Review of Materials of the Annual Information Handbook "Radiation Doses of the Population of the Bryansk Region from Various Sources of Ionizing Radiation" for 2022. *Aktual'nyye Voprosy Radiatsionnoy Gigiyeny = Actual Issues of Radiation Hygiene*. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. St. Petersburg, October 10–11, 2023, St. Petersburg, Research Institute of Radiation Hygiene named after Professor P.V. Ramzaev. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskiy Nauchno-Issledovatel'skiy Institut Radiatsionnoy Gigiyeny Im. Professora P.V. Ramzayeva Publ., 2023. P. 126-129 (In Russ.).
10. Proskuryakova N.L., Simakov A.V., Abramov Yu.V. Hygienic Aspects of Special Assessment of Working Conditions when Working with Sources of Ionizing Radiation. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*. 2022;4;67:19–23 (In Russ.). doi: 10.33266/1024-6177-2022-67-4-19-23.
11. Vishnevskaya T.V., Tsyplenkova M.Yu., Isubakova D.S., Tsymlal O.S., Mil'to I.V., Takhauov R.M. Evaluation of the Spectrum and Frequency of Chromosomal Aberrations in Blood Lymphocytes of Workers at a Nuclear Facility Over 15 Years of Work. *Radiatsionnaya Gigiyena = Radiation Hygiene*. 2025;18;1:18–26 (In Russ.). doi: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-18-26.
12. Khvostunov I.K., Krylov V.V., Rodichev A.A., Shepel' N.N., Korovchuk O.N., Kochetova T.Yu. Analysis of the Adverse Effects of Combined Radioiodine and Radiation Therapy in Patients with Thyroid Cancer. *Radiatsiya i risk (Byulleten' Byulleten' Natsional'nogo Radiatsionno-Epidemiologicheskogo Registra) = Radiation and Risk*. 2021;4:1–12 (In Russ.).

13. Vishnevskaya T.V., Isubakova D.S., Tsyplenkova M.Yu., Tsybmal O.S., Mil'to I.V., Takhauov R.M. Comparative Retrospective Analysis of the Results of Cytogenetic Studies of Workers at a Facility Using Ionizing Radiation *Meditinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2024;69;1:61–66 (In Russ.). doi: 10.33266/1024-6177-2024-69-1-61-66.
14. Bakanova M.L., Minina V.I., Savchenko Ya.A. Associations of Polymorphic Variants of Genes Encoding Xenobiotic Biotransformation Enzymes and Human Lung Cancer. *Meditinskaya Genetika* = Medical Genetics. 2012;11;125:13–20 (In Russ.).
15. Zhumabekova G.S., Amanbekova A.U., Ibrayeva L.K., Azhimetova G.N. Evaluation of Induced Mutagenesis in Workers of Chrysotile Asbestos Production. *Meditina Truda i Promyshlennaya Ekologiya* = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology. 2014;8:18–22 (In Russ.).
16. Tsybmal O.S., Isubakova D.S., Bronikovskaya Ye.V., Nikolayeva A.F., Sigin V.O., Kalinkin A.I., Kirillov V.M., Startseva Zh.A., Litvyakov N.V., Mil'to I.V., Takhauov R.M. Assessment of the Degree of DNA Methylation in Lymphocytes after a Single Irradiation of Blood In vitro. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* = Radiation Biology. Radioecology. 2024;2;64:126–135 (In Russ.). doi: 10.31857/S0869803124020021.
17. Kadlcikova D., Musilova P., Hradska H., Petrovova M., Selingerova I., Vozdova M., Svoboda M., Rubes J. Different Chromosome Damage in Lymphocytes of Newly Diagnosed Gastrointestinal and Breast Cancer Patients. *Neoplasma*. 2020;67;3:668–676. doi: 10.4149/neo_2020_190604N48.
18. Lee Y., Kang J.K., Lee Y.H., Yoon H.J., Yang S.S., Kim S.H., Seongjae J., Sunhoo P., Da H.H., Won I.J., Hyung J.Y., Eun K.P., Hyo R.L., Ki M.S. Chromosome Aberration Dynamics in Breast Cancer Patients Treated with Radiotherapy: Implications for Radiation Biodosimetry. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2021;872:503419. doi: 10.1016/j.mrgentox.2021.503419.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания, тема НИР «Изучение ассоциации вариабельности генов путей сигнальной трансдукции клетки с повышенной частотой хромосомных aberrаций в лимфоцитах крови работников Сибирского химического комбината».

Участие авторов. Вишневская Т.В. – подготовка текста статьи, анализ и интерпретация данных, сбор и анализ материала рукописи, разработка концепции и дизайна исследования; Брониковская Е.В. – проведение экспериментов, Цыпленкова М.Ю., Цыббал О.С. – проведение экспериментов и статистическая обработка данных; Иsubakova Д.С. – разработка концепции исследования, осуществление внутреннего аудита, Мильто И.В. – научное редактирование текста, проверка критически важного интеллектуального содержания; Тахауов Р.М. – научное редактирование текста, утверждение окончательного варианта рукописи.

Поступила: 20.07.2025. Принята к публикации: 25.08.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study was carried out as part of a state assignment, the topic of which was “Studying the Association of Gene Variability in Cell Signal Transduction Pathways with Increased Frequency of Chromosomal Aberrations in Blood Lymphocytes of Employees at the Siberian Chemical Plant”.

Contribution. Vishnevskaya T.V. – preparation of the article text, analysis and interpretation of data, collection and analysis of the manuscript material, development of the research concept and design; Bronikovskaya E.V. – conducting experiments, Tsyplenkova M.Yu., Tsybmal O.S. – conducting experiments and statistical data processing; Isubakova D.S. – development of the research concept, internal audit, Milto I.V. – scientific editing of the text, verification of critical intellectual content; Takhauov R.M. – scientific editing of the text, approval of the final version of the manuscript.

Article received: 20.07.2025. Accepted for publication: 25.08.2025.