

Е.В. Брагин

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ КАТАРАКТОЙ В КОГОРТЕ РАБОТНИКОВ, ПОДВЕРГШИХСЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ ХРОНИЧЕСКОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики ФМБА России, Озерск

Контактное лицо: Евгений Викторович Брагин, e-mail: clinic@subi.su

РЕФЕРАТ

Цель: Обзор результатов исследований заболеваемости катарактой, отдельными ее типами и оперированной катарактой в когорте работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению.

Материал и методы: Изучаемая когорта включала всех работников производственного объединения «Маяк», впервые нанятых на предприятие в период 1948–1982 гг. (22377 работников; 25,4 % – женщины). На конец периода наблюдения жизненный статус известен для 95 % членов изучаемой когорты; 53,5 % из них умерли и 46,5 % живы. Медицинская информация за весь период наблюдения была доступна для 97,3 % работников. Средняя суммарная доза внешнего гамма-облучения у мужчин составила $0,54 \pm 0,76$ Зв, у женщин – $0,44 \pm 0,65$ Зв. В исследовании использованы данные по поглощенным дозам внешнего и нейтронного облучения из дозиметрической системы работников ПО «Маяк» 2008 г. (ДСРМ-2008). Относительный риск и избыточный относительный риск на единицу дозы (ИОР/Гр) рассчитаны на основе метода максимального правдоподобия с помощью модуля AMFIT программного обеспечения EPICURE.

Результаты: Результаты анализа зависимости доза–эффект на основе линейной модели с учетом поправок на нерадиационные факторы и дозу нейтронного облучения показали повышенный риск заболеваемости катарактой всех типов: кортикальной, задней субкапсулярной и ядерной. Избыточный относительный риск на единицу дозы внешнего облучения (ИОР/Зв) составил 0,28 (95 % ДИ: 0,20–0,37) для катаракты всех типов; 0,63 (95 % ДИ: 0,49–0,76) для кортикальной катаракты; 0,91 (95 % ДИ: 0,67–1,20) для задней субкапсулярной катаракты и 0,47 (95 % ДИ: 0,35–0,60) для ядерной катаракты. Исключение поправки на дозу нейтронного облучения приводило к снижению ИОР/Зв внешнего гамма-облучения для катаракт всех типов. Не обнаружено статистически значимой зависимости оперированной катаракты от суммарной дозы внешнего гамма-облучения; ИОР/Зв составил 0,09 (95 % ДИ: –0,02–0,22). **Заключение:** В результате исследований катаракты в когорте работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению, представлены строгие доказательства связи заболеваемости старческой катарактой и отдельными ее типами (задняя субкапсулярная, кортикальная, ядерная) с внешним гамма-облучением.

Ключевые слова: катаракта, заболеваемость, профессиональное облучение, избыточный относительный риск

Для цитирования: Брагин Е.В. Обзор результатов исследований заболеваемости катарактой в когорте работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 6. С. 78–83. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-78-83

E.V. Bragin

Review of Research on Cataract Incidence in the Cohort of Workers Chronically Exposed to Ionizing Radiation

Southern Urals Federal Medical Biophysics Research Centre affiliated, Ozyorsk, Russia

Contact person: Evgeniy Victorovich Bragin, e-mail: clinic@subi.su

ABSTRACT

Purpose: The article aims to review the findings of studies that evaluated the incidence of cataracts, certain types of cataracts, and cataract surgery among workers chronically exposed to ionizing radiation during their occupational activities.

Material and methods: The study cohort included all employees of the Mayak Production Association who were hired between 1948 and 1982, 22,377 individuals of whom 25.4 % were females. At the end of the follow-up period, the life status was known for 95 % of the study cohort, of whom 53.5% had deceased and 46.5% were alive. Medical information over the entire follow-up period was available for 97.3 % of workers. The mean cumulative dose of gamma-rays from external exposure was 0.54 ± 0.76 Sv in males and 0.44 ± 0.65 Sv in females. To perform the analyses, estimates of absorbed doses from external and neutron exposure provided by the Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008) were used. The relative risk and the excess relative risk per unit dose (ERR/Gy) were calculated based on the maximum likelihood using the AMFIT module of the EPICURE software.

Results: The dose-response analysis based on the linear model taking into account adjustments for non-radiation factors and neutron dose demonstrated the increased incidence risk for all subtypes of cataracts, including cortical, posterior subcapsular, and nuclear cataracts. The excess relative risk per unit radiation dose from external exposure (ERR/Sv) was 0.28 (95 % CI: 0.20–0.37) for total cataracts; 0.63 (95 % CI: 0.49–0.76) for cortical cataracts, 0.91 (95 % CI: 0.67–1.20) for posterior subcapsular cataracts, and 0.47 (95 % CI: 0.35–0.60) for nuclear cataracts. Exclusion of the adjustment for the neutron dose resulted in a decrease in the ERR/Sv of gamma rays from external exposure for all types of cataracts. No significant association of the cataract surgery was observed with the accumulated gamma-ray dose from external exposure; the ERR/Sv was 0.09 (95 % CI: –0/02–0.22).

Conclusion: Studies of the cataract in the cohort of workers chronically exposed to ionizing radiation during the occupational activities provide strong evidence that the senile cataracts and cataract subtypes, including the posterior subcapsular, cortical, and nuclear cataracts, are associated with the external gamma-ray exposure.

Keywords: *cataract, incidence, occupational radiation exposure, excess relative risk*

For citation: Bragin EV. Review of Research on Cataract Incidence in the Cohort of Workers Chronically Exposed to Ionizing Radiation. Medical Radiology and Radiation Safety. 2025;70(6):78–83. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-6-78-83

Введение

Катаракта и глаукома являются значимой медико-социальной проблемой для многих стран мира, в том числе и для России. Это заболевание не только ухудшает качество жизни человека, но и является одной из основных причин слепоты в мире [1–4], при этом затраты на лечение катаракты остаются одной из главных статей расходов в здравоохранении.

Катаракта представляет собой любое стойкое помутнение вещества или капсулы хрусталика. В зависимости от причин возникновения выделяют врожденную катаракту, старческую, травматическую, осложненную и профессиональную катаракту. Преобладающей по частоте является старческая катаракта (далее по тексту «катаракта»); ее развитие обусловлено возрастными изменениями хрусталика, а заболеваемость повышается с увеличением возраста. В зависимости от клинико-анатомических характеристик различают три основных типа катаракты: ядерная, кортикальная и задняя субкапсулярная, которые могут быть представлены как изолированно, так и в различных сочетаниях [5].

Катаракта является многофакторным заболеванием. В результате многочисленных исследований были установлены факторы, способствующие развитию катаракты: ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, диабет, артериальная гипертензия, ожирение, курение, длительное использование кортикостероидных препаратов, предшествующие травмы и воспалительные заболевания глаз, хирургическое лечение глаз, заместительная гормонотерапия, злоупотребление алкоголем, высокая миопия и наследственная предрасположенность [6–10]. Кроме того, известно, что хрусталик является одним из наиболее радиочувствительных органов у человека [11, 12]. В результате многочисленных исследований был показан повышенный риск заболеваемости катарактой при различных сценариях облучения [13–18]. Однако вопрос о характере зависимости доза–эффект, особенно при хроническом облучении с низкой мощностью дозы, остается открытым.

В настоящей статье представлен обзор результатов ретроспективных когортных исследований заболеваемости катарактой и глаукомой в когорте работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению [19–25].

Материал и методы

Исследуемая когорта и период наблюдения

Исследуемая когорта включала всех работников производственного объединения (ПО) «Маяк», впервые нанятых на предприятие в период 1948–1982 гг. (22377 работников; 25,4 % – женщины).

ПО «Маяк» – первое в бывшем СССР масштабное оборонное предприятие атомной промышленности, введенное в эксплуатацию 19 июня 1948 г. на Южном Урале вблизи г. Озерска.

Период наблюдения за когортой начинался от даты найма на ПО «Маяк» и продолжался до первого из следующих событий: даты установления заболевания; даты смерти; 31 декабря 2008 г. для живых работников, проживающих в г. Озерске (резиденты); даты «последней медицинской информации» для резидентов с неизвестным жизненным статусом и для работников, выехавших

из г. Озерска на другое постоянное место жительства (мигранты).

Следует отметить, что медицинское наблюдение работников ПО «Маяк» осуществлялось с первых дней деятельности предприятия специальными медицинскими и научными учреждениями по разработанной и утвержденной Министерством здравоохранения СССР стандартной программе с обязательным ежегодным медицинским обследованием перед поступлением на работу и обязательными профилактическими медицинскими обследованиями, включающими осмотры различных врачей-специалистов, в том числе врача-офтальмолога, и клинико-лабораторные и инструментальные обследования.

Медицинская информация за весь период наблюдения была доступна для 97,3 % работников. Источниками информации являлись медицинские карты, истории болезни и другие медицинские документы, которые были подробно описаны ранее [26–30].

На момент найма на предприятие средний возраст у мужчин составил $24,11 \pm 7,13$ лет (\pm стандартное отклонение) и у женщин – $27,32 \pm 7,97$ лет. Продолжительность работы на ПО «Маяк» варьировала от 1 мес до 60 лет и, в среднем, составила $18,04 \pm 14,28$ лет; только 5,0 % работников проработали на ПО «Маяк» менее 1 года.

На конец периода наблюдения жизненный статус известен для 95 % членов изучаемой когорты; 53,5 % из них умерли и 46,5 % живы. Средний возраст на момент смерти у мужчин составил $61,52 \pm 13,63$ лет, у женщин – $70,48 \pm 12,44$ лет; а средний возраст тех, кто жив – $68,50 \pm 10,04$ лет и $76,59 \pm 9,75$ лет соответственно.

Дозиметрия

Все работники основных заводов ПО «Маяк» (реакторы, радиохимический и плутониевый заводы) подвергались хроническому облучению: работники реакторов только внешнему облучению (гамма- и нейтронному), а работники радиохимического и плутониевого заводов – как внешнему, так и внутреннему альфа-облучению (сочетанное облучение).

Индивидуальный мониторинг внешнего гамма-облучения работников начинался с момента найма на предприятие и проводился с помощью индивидуальных дозиметров.

В настоящем исследовании использованы индивидуальные годовые дозы профессионального облучения дозиметрической системы работников ПО «Маяк» – ДСРМ-2008 [31]. К сожалению, в ДСРМ-2008 отсутствует доза на глаз, поэтому в настоящем исследовании была использована индивидуальная поглощенная в головном мозге доза внешнего гамма- и нейтронного излучения ($H_p(10)$ – амбиентный эквивалент дозы) [32, 33]. Следует отметить, что статистически значимых различий между поглощенными дозами внешнего облучения для различных органов нет (коэффициент корреляции = 0,998). Средняя суммарная доза внешнего гамма-облучения у мужчин составила $0,54 \pm 0,76$ Зв, у женщин – $0,44 \pm 0,65$ Зв, а средняя суммарная доза нейтронного облучения – $0,034 \pm 0,080$ Зв и $0,033 \pm 0,092$ Зв соответственно. Распределение работников изучаемой когорты в зависимости от дозы облучения представлено на рис. 1 и 2.

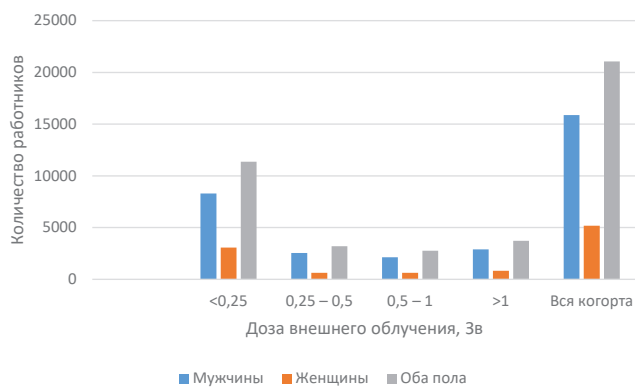


Рис. 1. Распределение работников изучаемой когорты в зависимости от суммарной дозы внешнего гамма-облучения

Fig. 1. Distribution of workers by cumulative dose from external gamma-ray

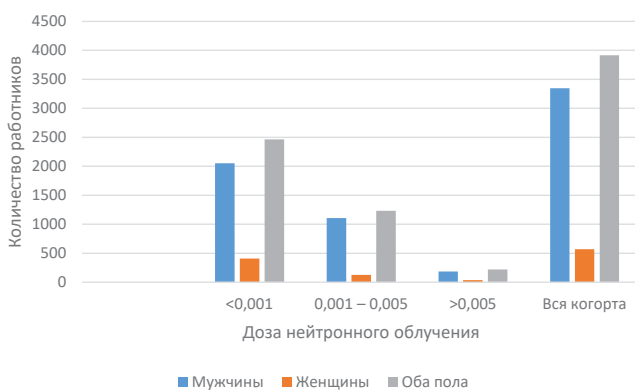


Рис. 2. Распределение работников изучаемой когорты в зависимости от суммарной дозы нейтронного облучения

Fig. 2. Distribution of workers by cumulative neutron dose

Статистический анализ

Статистический анализ включал оценку относительного риска (ОР) для категорий из одной или нескольких переменных с поправкой на другие переменные. ОР рассчитывался по методу максимального правдоподобия с помощью модуля AMFIT программы EPICURE [34]. 95 % доверительные интервалы для оценок относительного риска и p -значений для проверки статистической значимости были получены с помощью методов правдоподобия, используя модуль AMFIT.

Были проведены категориальный анализ и анализ зависимости доза–эффект с помощью метода Пуассоновской регрессии, с использованием модуля AMFIT программы EPICURE. Избыточный относительный риск на единицу дозы (ИОР/Гр) описывался с помощью линейного тренда от дозы внешнего облучения с поправкой (с помощью стратификации) на нерадиационные факторы (пол, достигнутый возраст, когорта рождения) и нейтронную дозу. Все критерии статистической значимости являлись двусторонними. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение заболеваемости катарактой, отдельными ее типами и оперированной катарактой

К концу периода наблюдения в изучаемой когорте работников было зарегистрировано 4159 случаев старческой катаракты (далее, катаракта) в течение 482217

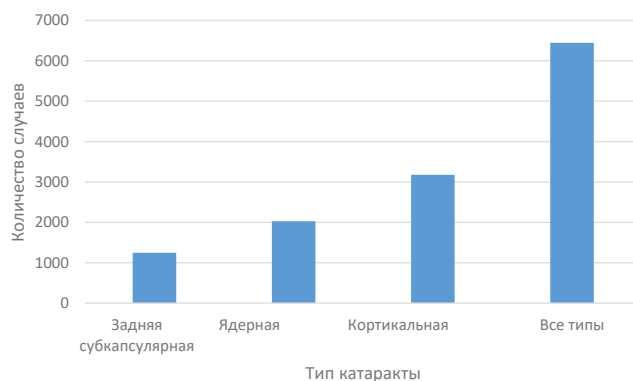


Рис. 3. Распределение случаев катаракты в зависимости от морфологического типа

Fig. 3. Distribution of cataract cases by morphological type

человеко-лет наблюдения. Распределение случаев катаракты в зависимости от типа представлено на рис. 3.

За весь период наблюдения в изучаемой когорте у 701 из 4177 работников с верифицированным диагнозом старческой катаракты была проведена лентэктомия (16,7 %), т.е. зарегистрирована оперированная катаракта: 447 случаев у мужчин (63,8 %) и 254 случая у женщин (36,2 %).

Риск заболеваемости катарактой всех типов увеличивался с увеличением достигнутого возраста. Установлено, что риск заболеваемости кортикальной и ядерной катарактой у женщин был ниже по сравнению с мужчинами ($p < 0,05$). Риск заболеваемости катарактой всех типов статистически значимо зависел от достигнутого возраста, пола, наличия сопутствующей глазной и соматической патологии (глаукома, высокая степень миопии, сахарный диабет). У женщин, злоупотребляющих алкоголем, риск заболеваемости задней субкапсулярной катарактой (ЗСК) и ядерной катарактой был выше ($p < 0,05$). Обнаружено снижение ОР заболеваемости ядерной катарактой у некурящих мужчин ($p < 0,05$). Риск заболеваемости катарактой у работников, впервые нанятых на предприятие до 1972 г., был статистически значимо ниже при сравнении с работниками, впервые нанятыми после 1972 г. [19–22]. Риск оперированной катаракты у женщин был ниже по сравнению с мужчинами ($p < 0,05$). ОР оперированной катаракты увеличивался с увеличением достигнутого возраста как у мужчин, так и у женщин. Обнаружен повышенный риск оперированной катаракты у курящих мужчин и женщины, но у женщин оценки были статистически незначимы. Риск оперированной катаракты увеличивался с увеличением индекса курения [23].

Повышенный ОР заболеваемости катарактой и отдельными ее типами был обнаружен у работников, подвергшихся внешнему гамма-облучению в дозе более 0,25 Зв, по сравнению с референс-группой (доза внешнего гамма-облучения менее 0,25 Зв). Не обнаружено статистически значимых оценок риска оперированной катаракты в изучаемой когорте работников. Следует отметить, что с увеличением дозы внешнего облучения ОР заболеваемости кортикальной катарактой повышался от 1,36 (95 % ДИ: 1,22–1,52) до 2,25 (95 % ДИ: 1,98–2,57); ОР заболеваемости ЗСК – от 1,37 (95 % ДИ: 1,14–1,64) до 2,55 (95 % ДИ: 2,06–3,15); и ОР заболеваемости ядерной катарактой – от 1,36 (95 % ДИ: 1,19–1,56) до 2,01 (95 % ДИ: 1,72–2,35) [24, 25].

В результате проведенных исследований обнаружена статистически значимая линейная зависимость заболе-

ваемости старческой катарактой и отдельными ее типами (задняя субкапсулярная, кортикальная, ядерная) от суммарной поглощенной в мозге дозы внешнего гамма-облучения. Оценки избыточного относительного риска представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты анализа избыточного относительного риска заболеваемости катарактой и отдельными ее типами на единицу дозы в изучаемой когорте работников
Results of the analysis of the excess relative risk of cataract incidence and cataract subtypes per unit dose in the studied cohort of workers

Тип катаракты	ИОР/Зв внешнего гамма-облучения (95 % ДИ)		
	Мужчины	Женщины	Оба пола
Старческая	0,23 (0,15–0,34)	0,23 (0,15–0,34)	0,28 (0,20–0,37)
Задняя субкапсулярная катаракта	0,46 (0,27–0,72)	0,46 (0,27–0,72)	0,91 (0,67–1,20)
Кортикальная	0,42 (0,30–0,56)	0,42 (0,30–0,56)	0,63 (0,51–0,76)
Ядерная	0,36 (0,23–0,51)	0,36 (0,23–0,51)	0,47 (0,35–0,60)

Результаты анализа зависимости доза–эффект на основе линейной модели с учетом поправок на нерадиационные факторы и дозу нейтронного облучения показали повышенный риск заболеваемости катарактой всех типов: кортикальной, ЗСК и ядерной. Избыточный относительный риск на единицу дозы внешнего облучения (ИОР/Зв) составил 0,28 (95 % ДИ: 0,20–0,37) для всех типов катаракты; 0,63 (95 % ДИ: 0,49–0,76) для кортикальной катаракты; 0,91 (95 % ДИ: 0,67–1,20) для ЗСК и 0,47 (95 % ДИ: 0,35–0,60) для ядерной катаракты. Исключение поправки на дозу нейтронного облучения приводило к снижению ИОР/Зв внешнего гамма-облучения для катаракт всех типов. Оценки риска заболеваемости катарактой и отдельными ее типами снижались при включении дополнительных поправок на индекс массы тела и индекс курения, в то время как введение поправки на глаукому приводило к незначительному увеличению риска заболеваемости кортикальной и ядерной катарактами (но не ЗСК). Включение поправки на наличие сахарного диабета приводило к снижению ИОР/Зв внешнего облучения только для заболеваемости ЗСК [24, 25].

Не обнаружено статистически значимой зависимости оперированной катаракты от суммарной дозы внешнего гамма-облучения; ИОР/Зв составил 0,09 (95 % ДИ: –0,02–0,22) [27].

Представленные в обзоре исследования являются ретроспективными когортными исследованиями, имеющими много сильных сторон. Прежде всего, это большая численность когорты (более 22000 человек), включающей 25 % женщин, с большим периодом наблюдения (более 70 лет). Одним из главных преимуществ этих исследований является то, что профилактическое медицинское обследование (ПМО) работников изучаемой когорты проводилось в обязательном порядке ежегодно в течение всего периода наблюдения и обязательно включало осмотр врача-офтальмолога и офтальмологическое обследование с использованием стандартных методов, независимо от возраста работника, места работы, профессии, продолжительности работы, дозы облучения и др. Следует подчеркнуть, что при таком обязательном и бесплатном наблюдении систематические ошибки, возникающие из-за различий в доступности медицинской помощи, исключены. Большим преимуществом этих исследований являлась полная информация о перенесенных заболеваниях за весь период наблюдения и о нерадиационных факторах, полученная во время стандартных опросов при проведении ПМО, в том числе их количественные характеристики (артериальное давление,

диабет, статус и индекс курения, статус употребления алкоголя). Причем в отличие от многих других исследований эта информация получена в процессе длительного ежегодного медицинского наблюдения и зарегистрирована в медицинских документах и медико-дозиметрической базе данных «Клиника» [35].

Измеренная индивидуальным дозиметром доза внешнего облучения также является одним из преимуществ исследований. Хотя следует отметить, что доза непосредственно на хрусталик глаза в дозиметрической системе работников ПО «Маяк» отсутствовала. Однако, если учесть то, что работники подвергались, в основном, равномерному облучению, передвигаясь в полях излучений, то это ограничение не имеет существенного значения в полученной оценке риска, так как дозы внешнего облучения в отдельных органах и тканях тесно коррелировали между собой (коэффициент корреляции = 0,998).

Результаты, полученные в представленных исследованиях, свидетельствуют о зависимости неядерных типов катаракты от дозы внешнего облучения, что хорошо согласуется с результатами других исследований [11, 14, 15, 17, 18], и в том числе с результатами мета-анализа, представленными в обзоре [36]. В то же время следует отметить, что в изучаемой когорте работников ПО «Маяк», подвергшихся хроническому облучению, обнаружен повышенный риск ядерной катаракты в отличие от японской когорты лиц, выживших после атомной бомбардировки [17, 18] и когорты ликвидаторов последствий Чернобыльской аварии [16]. На наш взгляд, эти различия можно объяснить разными сценариями облучения (острое и хроническое) и существенными различиями в дизайнах исследований, а также большими неопределенностями дозы у ликвидаторов последствий аварии на ЧАЭС.

В то же время, в результате настоящего исследования не выявлено статистически значимой зависимости оперированной катаракты от суммарной дозы внешнего гамма-облучения.

Сравнение полученных результатов заболеваемости оперированной катарактой с результатами других исследований затруднено, так как исследования оперированной катаракты крайне ограничены. Во всех доступных исследованиях (японская когорта AHS) показан статистически значимый повышенный риск оперированной катаракты в зависимости от облучения [37–39]. Так, в первой статье показано, что среди лиц, прошедших офтальмологическое обследование в 2000 – 2002 гг. – 3761 человек, выявлено 479 случаев оперированной катаракты, и частота оперированной катаракты статистически значимо увеличивалась с увеличением дозы облучения; (ОШ=1,39 (95 % ДИ: 1,24–1,55) при облучении 1,0 Гр) [37]. Во второй работе, где выполнен анализ субкогорты 6066 человек, наблюдавшихся в период 1986–2005 гг., было выявлено 1028 случаев катаракты, удаленной хирургическим путем [38]. Выявлена статистически значимая зависимость оперированной катаракты от дозы облучения; причем линейная модель наилучшим образом описывала зависимость доза–эффект. ИОР/ Гр для 70-летнего человека, облученного в возрасте 20 лет, составил 0,32 (95 % ДИ: 0,17–0,52).

Эти различия могут быть связаны с различными сценариями облучения, с мощностью дозы облучения (острое и хроническое), возрастом на момент облучения, национальностью, периодом наблюдения, скоростью прогрессирования катаракты, различиями в доступности медицинской помощи и др.

В заключение следует отметить, что данные об оценках риска развития катаракты при различных сценариях

облучения и их модификации в зависимости от различных факторов постоянно накапливаются. Однако нерешенные вопросы остаются: характер зависимости доза–эффект, латентный период развития катаракты, влияние мощности дозы излучения.

Заключение

Таким образом, в когорте работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению, обнаружен повышенный риск заболеваемости катарактой и отдельными ее типами; установлена статистически значимая линейная зависимость заболеваемости старческой

катарактой и отдельными ее типами от суммарной дозы внешнего гамма-облучения с учетом поправок на нерадиационные факторы (пол, достигнутый возраст, период рождения) и дозу нейтронного облучения. Не обнаружено статистически значимой зависимости оперированной катаракты от суммарной дозы внешнего гамма-облучения.

Результаты исследований когорты работников ПО «Маяк», подвергшихся хроническому облучению, внесут вклад в накапливающийся объем данных, являющихся основой для совершенствования рекомендаций по радиологической защите.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

- Abraham A.G., Condon N.G., West Gower E. The New Epidemiology of Cataract. *Ophthalmol Clin North Am.* 2006;19;4:415–425. doi: 10.1016/j.ohc.2006.07.008. PMID: 17067897.
- Resnikoff S., Pascolini D., Etya'ale D., Kocur I., Pararajasegaram R., Pokharel G.P., Mariotti S.P. Global Data on Visual Impairment in the Year 2002. *Bull World Health Organ.* 2004;82;11:844–851. PMID: 15640920.
- Foster A. Cataract and «Vision 2020-the Right to Sight» Initiative. *Br J Ophthalmol.* 2001;85;6:635–637. doi: 10.1136/bjo.85.6.635. PMID: 11371475.
- Roodhooft J.M. Leading Causes of Blindness Worldwide. *Bull Soc Belge Ophtalmol.* 2002;283:19–25. PMID: 12058483.
- Chylack L.T.Jr., Wolfe J.K., Singer D.M., Leske M.C., Bullimore M.A., Bailey I.L., Friend J., McCarthy D., Wu S.Y. The Lens Opacities Classification System III. The Longitudinal Study of Cataract Study Group. *Arch Ophthalmol.* 1993;111;6:831–836. doi: 10.1001/archophth.1993.01090060119035. PMID: 8512486.
- Navarro Esteban J.J., Gutiérrez Leiva J.A., Valero Caracena N., Buendía Bermejo J., Calle Purón M.E., Martínez Vizcaino V.J. Prevalence and Risk Factors of Lens Opacities in the Elderly in Cuenca, Spain. *Eur J Ophthalmol.* 2007;17;1:29–37. doi: 10.1177/112067210701700105. PMID: 17294380.
- Kanthan G.L., Mitchell P., Burlutsky G., Wang J.J. Fasting Blood Glucose Levels and the Long-Term Incidence and Progression of Cataract -- the Blue Mountains Eye Study. *Acta Ophthalmol.* 2011;89;5:e434–e438. doi: 10.1111/j.1755-3768.2011.02149.x. PMID: 21457484.
- Rahman A., Yahya K., Shaikh A., Fasih U., Zuberi B.F. Risk Factors Associated with Pre-Senile Cataract. *Pak J Med Sci.* 2011;27;1:145–148.
- Wu R., Wang J.J., Mitchell P., Lamoureux E.L., Zheng Y., Rochtchina E., Tan A.G., Wong T.Y. Smoking, Socioeconomic Factors, and Age-Related Cataract: The Singapore Malay Eye Study. *Arch Ophthalmol.* 2010;128;8:1029–1035. doi: 10.1001/archophth.2010.147. PMID: 20697004.
- Tan J.S., Wang J.J., Younan C., Cumming R.G., Rochtchina E., Mitchell P. Smoking and the Long-Term Incidence of Cataract: the Blue Mountains Eye Study. *Ophthalmic Epidemiol.* 2008;15;3:155–161. doi: 10.1080/09286580701840362. PMID: 18569810.
- Otake M., Schull W.J. A Review of Forty-Five Years Study of Hiroshima and Nagasaki Atomic Bomb Survivors. Radiation cataract. *J Radiat Res.* 1991;32;Suppl:283–293. doi: 10.1269/jrr.32.supplement_283. PMID: 1762117.
- Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Лучевая болезнь человека. М.: Медицина, 1971. 391 с. [Gus'kova A.K., Baysogolov G.D. *Luchevaya Bolez'n' Cheloveka* = Human Radiation Sickness. Moscow, Meditsina Publ., 1971. 391 p. (In Russ.)].
- Hall P., Granath F., Lundell M., Olsson K., Holm L.E. Lenticular Opacities in Individuals Exposed to Ionizing Radiation in Infancy. *Radiat Res.* 1999;152;2:190–195. PMID: 10409329.
- Chodick G., Bekiroglu N., Hauptmann M., Alexander B.H., Freedman D.M., Doody M.M., Cheung L.C., Simon S.L., Weinstock R.M., Bouville A., Sigurdson A.J. Risk of Cataract after Exposure to Low Doses of Ionizing Radiation: a 20-Year Prospective Cohort Study among US Radiologic Technologists. *Am J Epidemiol.* 2008;168;6:620–631. doi: 10.1093/aje/kwn171. PMID: 18664497.
- Minamoto A., Taniguchi H., Yoshitani N., Mukai S., Yokoyama T., Kumagami T., Tsuda Y., Mishima H.K., Amemiya T., Nakashima E., Neriishi K., Hida A., Fujiwara S., Suzuki G., Akahoshi M. Cataract in Atomic Bomb Survivors. *Int J Radiat Biol.* 2004;80;5:339–345. doi: 10.1080/09553000410001680332. PMID: 15223766.
- Worgul B.V., Kundiyev Y.I., Sergiyenko N.M., Chumak V.V., Vitte P.M., Medvedovsky C., Bakhanova E.V., Junk A.K., Kyrychenko O.Y., Musijachenko N.V., Shylo S.A., Vitte O.P., Xu S., Xue X., Shore R.E. Cataracts among Chernobyl Clean-Up Workers: Implications Regarding Permissible Eye Exposures. *Radiat Res.* 200;167;2:233–243. doi: 10.1667/r0298.1. PMID: 17390731.
- Cucinotta F.A., Manuel F.K., Jones J., Iszard G., Murrey J., Djojonegro B., Wear M. Space Radiation and Cataracts in Astronauts. *Radiat Res.* 2001;156;5 Pt 1:460–466. doi: 10.1667/0033-7587(2001)156[0460:rsracc]2.0.co;2. PMID: 11604058.
- Rafnsson V., Olafsdottir E., Hrafnkelsson J., Sasaki H., Arnarsson A., Jonsson F. Cosmic Radiation Increases the Risk of Nuclear Cataract in Airline Pilots: a Population-Based Case-Control Study. *Arch Ophthalmol.* 2005;123;8:1102–1105. doi: 10.1001/archophth.123.8.1102. PMID: 16087845.
- Azizova T.V., Bragin E.V., Hamada N., Bannikova M.V. Risk of Cataract Incidence in a Cohort of Mayak PA Workers Following Chronic Occupational Radiation Exposure. *PLoS One.* 2016;11;10:e0164357. doi: 10.1371/journal.pone.0164357. PMID: 27723789.
- Брагин Е.В., Азизова Т.В., Банникова М.В., Фомин Е.П. Заболеваемость катарактой в когорте работников, подвергшихся профессиональному пролонгированному облучению // Офтальмология. 2016. Т.13. № 2. С. 115–121 [Bragin Ye.V., Azizova T.V., Bannikova M.V., Fomin Ye.P. Incidence of Cataract in a Cohort of Workers Exposed to Occupational Prolonged Irradiation. *Oftal'mologiya* = Ophthalmology. 2016;13;2:115-121 (In Russ.)].
- Брагин Е.В., Азизова Т.В., Банникова М.В. Риск заболеваемости старческой катарактой в когорте работников предприятия атомной промышленности // Вестник офтальмологии. 2017. № 2. С. 57–63 [Bragin Ye.V., Azizova T.V., Bannikova M.V. Risk of Senile Cataract Incidence in a Cohort of Workers at a Nuclear Industry Enterprise. *Vestnik Oftal'mologii* = Russian Annals of Ophthalmology. 2017;2:57-63 (In Russ.)].
- Азизова Т.В., Брагин Е.В., Хамада Н., Банникова М.В. Оценка риска заболеваемости старческой катарактой в когорте работников предприятия атомной промышленности ПО «Маяк» // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2018. Т. 63. № 4. С. 15–21 [Azizova T.V., Bragin Ye.V., Khamada N., Bannikova M.V. Assessment of the Risk of Senile Cataract in a Cohort of Workers of the Nuclear Industry Enterprise PO Mayak. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2018;63;4:15-21 (In Russ.)].
- Azizova T.V., Hamada N., Bragin E.V., Bannikova M.V., Grigoryeva E.S. Risk of Cataract Removal Surgery in Mayak PA

- Workers Occupationally Exposed to Ionizing Radiation Over Prolonged Periods. *Radiat Environ Biophys.* 2019;58;2:139–149. doi: 10.1007/s00411-019-00787-0. PMID: 30879144.
24. Azizova T.V., Hamada N., Grigoryeva E.S., Bragin E.V. Risk of Various Types of Cataracts in a Cohort of Mayak Workers Following Chronic Occupational Exposure to Ionizing Radiation. *Eur J Epidemiol.* 2018;33;12:1193–1204. doi: 10.1007/s10654-018-0450-4. PMID: 30306422.
 25. Азизова Т.В., Хамада Н., Григорьева Е.С., Брагин Е.В. Риск различных типов катаракты в когорте работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65. № 4. С. 48–57 [Azizova T.V., Khamada N., Grigor'yeva Ye.S., Bragin Ye.V. Risk of Various Types of Cataracts in a Cohort of Workers Exposed to Occupational Chronic Irradiation. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65;4:48-57 (In Russ.)].
 26. Azizova T.V., Grigorieva E.S., Hunter N., Pikulina M.V., Moseeva M.B. Risk of Mortality from Circulatory Diseases in Mayak Workers Cohort Following Occupational Radiation Exposure. *J Radiol Prot.* 2015;35;3:517–538. doi: 10.1088/0952-4746/35/3/517. PMID: 26082993.
 27. Azizova T.V., Grigoryeva E.S., Haylock R.G., Pikulina M.V., Moseeva M.B. Ischaemic Heart Disease Incidence and Mortality in an Extended Cohort of Mayak Workers First Employed in 1948-1982. *Br J Radiol.* 2015;88;1054:20150169. doi: 10.1259/bjr.20150169. PMID: 26224431.
 28. Azizova T.V., Zhuntova G.V., Haylock R., Moseeva M.B., Grigoryeva E.S., Bannikova M.V., Belyaeva Z.D., Bragin E.V. Chronic Bronchitis Incidence in the Extended Cohort of Mayak Workers First Employed during 1948-1982. *Occup Environ Med.* 2017;74;2:105–113. doi: 10.1136/oemed-2015-103283. PMID: 27647620.
 29. Azizova T.V., Bannikova M.V., Grigoryeva E.S., Rybkina V.L. Risk of Malignant skin Neoplasms in a Cohort of Workers Occupationally Exposed to Ionizing Radiation at Low Dose Rates. *PLoS One.* 2018;13;10:e0205060. doi: 10.1371/journal.pone.0205060. PMID: 30289933.
 30. Azizova T.V., Hamada N., Grigoryeva E.S., Bragin E.V. Risk of Various Types of Cataracts in a Cohort of Mayak Workers Following Chronic Occupational Exposure to Ionizing Radiation. *Eur J Epidemiol.* 2018;33;12:1193–1204. doi: 10.1007/s10654-018-0450-4. PMID: 30306422.
 31. Vasilenko E.K., Scherpelz R.I., Gorelov M.V., Stram D.J., Smetanin M.Y. External Dosimetry Reconstruction for Mayak Workers. 2010. AAHP Special Session Health Physics Society Annual Meeting. URL: http://www.hpsl.org/aaHP/public/AAHP_Special_Session/2010_Salt_Lake_City/pm-1.pdf
 32. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Vostrotnin V.V., Vvedensky V.E., Sokolova A.B., Krahenbuhl M.P., Birchall A., Miller S.C., Schadilov A.E., Ephimov A.V. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of Internal Dose from Measurement Results of Plutonium Activity in Urine. *Health Phys.* 2013;104;4:366–78. doi: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60. PMID: 23439140.
 33. ICRP. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP. 2007;37;2-4:1–332. doi: 10.1016/j.icrp.2007.10.003. PMID: 18082557.
 34. Preston D., Lubin J., Pierce D., McConney M. *Epicure Users Guide.* Seattle, WA, Hirosoft, 1993.
 35. 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. Т. 54. № 5. С. 26–35 [Azizova T.V., Teplyakov I.I., Grigor'yeva Ye.S. Medical and Dosimetric Database «Clinic» of Workers of the Mayak Production Association and their Families. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 2009;54;5:26–35 (In Russ.)].
 36. NCRP. Guidance on Radiation Dose Limits for the Lens of the Eye. NCRP Commentary No. 26. Bethesda, MD, National Council on Radiation Protection and Measurements, 2016.
 37. Nakashima E., Neriishi K., Minamoto A., Ohishi W., Akahoshi M. Radiation Dose Responses, Thresholds, and False Negative Rates in a Series of Cataract Surgery Prevalence Studies among Atomic Bomb Survivors. *Health Phys.* 2013;105;3:253–260. doi: 10.1097/HP.0b013e3182932e4c. PMID: 30522249.
 38. Neriishi K., Nakashima E., Akahoshi M., Hida A., Grant E.J., Masunari N., Funamoto S., Minamoto A., Fujiwara S., Shore R.E. Radiation Dose and Cataract Surgery Incidence in Atomic Bomb Survivors, 1986-2005. *Radiology.* 2012;265;1:167–174. doi: 10.1148/radiol.12111947. PMID: 22875798.
 39. Neriishi K., Nakashima E., Minamoto A., Fujiwara S., Akahoshi M., Mishima H.K., Kitaoka T., Shore R.E. Postoperative Cataract Cases among Atomic Bomb Survivors: Radiation Dose Response and Threshold. *Radiat Res.* 2007;168;4:404–408. doi: 10.1667/RR0928.1. PMID: 17903036.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках Государственного контракта от 6 июня 2024 г. №11.313.24.2 с Федеральным медико-биологическим агентством «Оценка эффектов хронического облучения и изучение их патогенеза для совершенствования медицинского обеспечения персонала и населения, подвергшихся радиационному воздействию».

Участие авторов. Е.В. Брагин – концепция исследования, написание текста статьи, обзор литературы.

Поступила: 20.07.2025. Принята к публикации: 25.08.2025.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Financing. The study was carried out within the framework of the state contract as of 6 June 2024 №11.313.24.2 with Federal medical biological agency titled “Assessment of chronic radiation exposure effects and study of their pathogenesis for improvement of medical provision for personal and population exposed to radiation”.

Contribution. E.V. Bragin – development of the research concept, article authoring, literature review.

Article received: 20.07.2025. Accepted for publication: 25.08.2025.