

ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Научно-практический журнал
ФГУП "ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "МАЯК"
Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом"

Издаётся с 1996 г., периодичность – 4 номера в год
№ 3 (111) 2023 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР Ю.Г. МОКРОВ
ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА И.Г. ТАНАНАЕВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.В. Аксеев, В.Н. Большаков, Л.А. Большов, В.И. Величкин, Е.А. Демченко (отв. секретарь), М.В. Жуковский, И.А. Иванов, Л.А. Ильин, С.Н. Калмыков, П.В. Козлов, Д.Н. Колупаев, Н.А. Кошурникова, А.И. Крышев, А.А. Куваев, И.И. Линге, М.В. Логунов, Б.Ф. Мясоєдов, В.Н. Позолотина, Е.А. Пряхин, С.А. Романов, М.Э. Сокольников, Е.И. Толстых, С.С. Уткин, А.П. Хомяков, В.Ф. Хохряков, Е.А. Шишкина, С.В. Юдинцев, Ю.Т. Юлдашев

СОДЕРЖАНИЕ

К 70-летию юбилею ЮУриБФ	3
1. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	
Ефимов А.В., Соколова А.Б., Суслова К.Г. Основные итоги научно-практической деятельности Южно-Уральского института биофизики в области радиационной безопасности	4
Аладова Е.Е., Алдошин А.И., Финашов Л.В., Маров В.А., Романов Е.В. Мониторинг радиационной обстановки в зоне наблюдения ПО "Маяк"	16
Аладова Е.Е., Ефимов А.В., Алдошин А.И., Хорешко Л.Л. Реагирование на радиационные инциденты в зоне ответственности Южно-Уральского регионального аварийного медико-дозиметрического центра ФМБА России	25
2. ОБЛУЧЕНИЕ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА	
Рыбкина В.Л., Ослина Д.С., Азизова Т.В., Другова Е.Д., Адамова Г.В. Факторы роста у лиц, подвергшихся профессиональному хроническому облучению	33
Сокольников М.Э., Кабирова Н.Р., Окатенко П.В., Кошурникова Н.А., Царева Ю.В., Мартиненко И.А., Денисова Е.В. Медико-дозиметрический регистр персонала производственного объединения "Маяк": Состояние и перспективы	42
Тельнов В.И. О некоторых демографических проблемах населения моногорода атомной промышленности Озёрска	56

СОДЕРЖАНИЕ

Сыпко С.А., Введенский В.Э., Бобов Г.Н. Физико-химические свойства субмикронных аэрозолей ^{239}Pu	70
Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Итоги научных исследований лаборатории радиационной безопасности № 6 Южно-Уральского института биофизики за 2012–2022 годы	85
3. ИНФОРМАЦИЯ И ПЕРСОНАЛИИ	
Трапезников А.В.	94
CONTENTS	95
ABSTRACTS	97
Сведения об авторах статей	101

Журнал включён в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук.

Уважаемые читатели!

Номер журнала, который вы держите в руках, необычный. Его выход приурочен к 70-летию Южно-Уральского института биофизики, и он полностью составлен из научных статей учёных института.

Институт расположен в г. Озёрске Челябинской области и ведёт свою историю с 1953 года, когда заместитель министра здравоохранения СССР А.И. Бурназян подписал приказ об организации филиала клиники Института биофизики – ФИБ-1 (ныне ФГБУН ЮУрИБФ ФМБА России) на базе специализированного больничного отделения ("вторая терапия") МСО-71. Заведующим филиала был назначен гематолог Г.Д. Байсоголов. Дальнейшее расширение ФИБ-1 произошло путём присоединения части биологического отдела ЦЗЛ ФГУП "ПО "Маяк" (1955 г.) и части научных сотрудников, работавших в биофизическом отделе Лаборатории "Б" (Сунгуль).

Первоначально перед работниками института была поставлена задача по лечению работников атомных производств, подвергшихся повышенному облучению, с подозрением на лучевые заболевания. Но практически одновременно в стенах института получили развитие фундаментальные и прикладные научные исследования в области радиационной медицины, радиационной эпидемиологии, дозиметрии, радиобиологии, гигиены труда, радиационной безопасности и защиты персонала атомной промышленности и населения зон наблюдения.

К числу основных достижений учёных ЮУрИБФ следует отнести:

1. На основе наблюдения за пострадавшими от внешнего облучения работниками ПО "Маяк" была впервые описана нозологическая единица – хроническая лучевая болезнь.

2. Открыто заболевание лёгких, связанное с вдыханием плутония, – плутониевый пневмосклероз и механизмы его патогенеза.

3. Описано биологическое поведение плутония в организме человека.

4. Создана научно-обоснованная система дозиметрического контроля и ретроспективного восстановления доз облучения от инкорпорированных трансурановых нуклидов.

5. Доказана необходимость снижения действующих в настоящее время значений предельного годового поступления ^{239}Pu , что учтено в рекомендациях МКРЗ (публикация 141).

Учёные ЮУрИБФ участвуют в работе самых авторитетных российских и международных профессиональных организаций: членом Российской научной комиссии по радиологической защите является директор С.А. Романов; в Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) состоят С.А. Романов, замдиректора по научной работе М.Э. Сокольников, заведующий клиническим отделом Т.В. Азизова; членом Российской делегации и экспертом в Научном комитете по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН) является С.А. Романов; в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ) С.А. Романов регулярно выступает приглашённым экспертом.

Сотрудники ЮУрИБФ в рамках российско-американского соглашения "О сотрудничестве в области изучения радиационных воздействий с целью минимизации последствий радиоактивного загрязнения на здоровье человека и окружающую среду" и в рамках 6-й и 7-й рамочных программ EURATOM осуществляли совместные интегрированные международные проекты с учёными из Японии, Германии, США, Норвегии и других стран.

От имени редколлегии нашего журнала поздравляю ветеранов и действующих сотрудников института с 70-летием со дня образования ФГБУН ЮУрИБФ и желаю им благополучия, крепкого здоровья и новых научных достижений.

Ю.Г. Мокров, главный редактор журнала
"Вопросы радиационной безопасности"

УДК 546.798.22:614.876

© 2023

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО ИНСТИТУТА БИОФИЗИКИ В ОБЛАСТИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

*А.В. Ефимов, А.Б. Соколова, К.Г. Суслова**Россия, г. Озёрск, ФГБУН Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России*

За период существования Южно-Уральского института биофизики, благодаря специалистам лаборатории № 3 отдела радиационной безопасности и дозиметрии, был накоплен огромный объем информации в области радиационной безопасности и радиационного контроля внутреннего облучения. Уникальный многолетний опыт лаборатории № 3 ЮУрИБФ позволяет в настоящее время решать как практические задачи дозиметрического контроля работников радиационно опасных производств, так и вносить существенный вклад в развитие мировой научной базы в сфере радиационной защиты и безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, ПЛУТОНИЙ

Одной из важнейших составляющих обеспечения радиационной безопасности персонала является радиационный контроль в целом и индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) облучения как его составляющая.

Первое российское предприятие по производству оружейного плутония ФГУП "ПО "Маяк" начало функционировать в августе 1948 г. В короткий срок были введены в эксплуатацию реакторное, радиохимическое и химико-металлургическое производства. На начальном этапе работы предприятия практически все технологические операции выполнялись в непригодных помещениях, отсутствовали средства индивидуальной защиты. Следствием неблагоприятных условий труда были профессиональные заболевания персонала, что вызвало необходимость создания специализированной медсанчасти № 71 в начале 1950-х гг., затем на её базе был создан научно-исследовательский институт – в настоящее время Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Южно-Уральский институт биофизики" Федерального медико-биологического агентства России (ФГБУН ЮУрИБФ) [1]. С начала своей деятельности и по настоящее время Южно-Уральский институт биофизики проводит фундаментальные и прикладные исследования во многих областях, связанных

с радиационной безопасностью, в том числе решает актуальные задачи по совершенствованию методов контроля облучения и минимизации его последствий, разработке стандартов безопасности для персонала и населения.

Производство плутония представляет собой сложный технологический процесс, сопровождающийся широким спектром факторов вредности: доминирующим фактором радиационного характера является внутреннее облучение персонала изотопами плутония. Наиболее эффективным методом контроля доз внутреннего облучения, обусловленного поступлением актинидов, является метод косвенной дозиметрии, основанный на интерпретации результатов измерений нуклидов в экскретах [2]. Надежность интерпретации результатов измерений в большей степени зависит от выбора адекватной модели поведения радионуклида в организме человека.

Задачи по исследованию механизмов распределения радионуклидов в организме человека и их биокинетики (в том числе на микроуровне и с учётом модифицирующих факторов), формирования дозы облучения и других вопросов совершенствования биокинетических и дозиметрических моделей являются актуальными задачами радиационного контроля и радиационной безопасности в целом.

Накопленный многолетний опыт в области радиационной безопасности лаборатории № 3 ЮУрИБФ позволяет решать как практические задачи дозиметрического контроля работников радиационно опасных производств, так и вносить существенный вклад в развитие мировой научной базы в сфере радиационной защиты и безопасности [1, 3–19].

ПРАКТИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

После пуска в эксплуатацию первого в стране оборонного предприятия ядерно-топливного цикла, для решения возникающих в процессе работы предприятия проблем облучения персонала, связанных в том числе с аварийными ситуациями, в научно-исследовательском институте ФИБ-1 было начато выполнение практических мероприятий по дозиметрическому контролю внутреннего облучения персонала ФГУП "ПО "Маяк". В процессе обследования и лечения персонала проводились оценки уровней внутреннего облучения; система дозиметрического контроля поступления актинидов в лаборатории № 3 ЮУрИБФ сформировалась к середине 1960-х гг. [1, 20].

Развитие и совершенствование методов контроля

Биофизический метод

Лаборатория № 3 ЮУрИБФ (ранее ФИБ-1) приступила к измерениям содержания плутония в моче у работников ФГУП "ПО "Маяк" в 1953 г. (в среднем по 50 чел. в год), для измерений использовался α -радиометрический метод [21]. Применение только α -радиометрического метода в лаборатории продолжалось в течение продолжительного периода времени, 1955–2000 гг. Как показал ретроспективный анализ данных, до 1960 г. метод характеризовался высоким значением среднего фона лаборатории – фоновой α -активности, вносимой в ходе химического анализа, и его стандартным отклонением, обусловленным высокими уровнями активности плутония в пробах. Для измерений плутония в 1955–1967 гг. использовался высокофоновый α -радиометр с эффективностью измерений 40 %, с конца 1960-х по 2000 гг. – сцинтилляци-

онный низкофоновый α -радиометр с эффективностью около 95 % [22].

Плановые биофизические обследования работников ФГУП "ПО "Маяк" начались в 1960-х годах. Из-за несовершенства радиохимических методов при большом значении фона лаборатории обследование персонала проводили с использованием лечебных средств, увеличивающих уровень экскреции с мочой, таких как пентацин и цинкацин.

В середине 1970-х в лаборатории № 3 была внедрена новая более совершенная система индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения персонала ФГУП "ПО "Маяк". Изменения коснулись как метода выполнения измерения активности плутония, так и организации проведения обследований. Обследования стали проводить после длительного перерыва в контакте работника с промышленными аэрозолями плутония (после очередного отпуска), что исключило вклад быстрой (транзитной) фракции мочевой экскреции в результат измерения активности плутония в моче. В 1970-х годах были проведены мероприятия по снижению фона лаборатории, что позволило производить оценки доз по уровню естественной экскреции плутония с мочой.

В 1998 г. в лаборатории № 3 начали выполнять измерения с использованием α -спектрометра ORTEC OSTETM PCTM. Методика радиохимического анализа, основанная на анионообменном разделении актинидов и использовании α -спектрометрии для измерения ^{241}Am , изотопов Pu и U, позволяет определять активность ^{241}Am , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U в суточной порции мочи на уровне 1 мБк, что на порядок ниже по сравнению с радиометрической экспресс-методикой [22, 23].

В последние годы в качестве более чувствительного метода измерения активности радионуклидов в биосубстратах всё большее распространение находит метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). В 2021 г. для измерений ультрамалой активности плутония и урана в биопробах внедрён метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Специалистами лаборатории была разработана методика измерений, позволяющая определять активность ^{239}Pu от 0,1 до 5,0 мБк в суточном количестве мочи (СКМ) и в

аликвоте крови 10 мл после анионообменного разделения; активность ^{240}Pu от 0,2 до 5,0 мБк в СКМ после анионообменного разделения; активность ^{235}U и ^{238}U от 1 до 25 мБк·дм⁻³ в озолённой аликвоте мочи 5 мл без анионообменного разделения [24].

Несмотря на непрерывное совершенствование аналитических методов и измерительной аппаратуры, этапы биофизического метода остаются неизменными:

- сбор суточного количества мочи с дальнейшим отбором определённой аликвоты (в разные годы её объём менялся от 100 до 500 мл);

- проведение радиохимической подготовки пробы, приготовление образца для измерения;

- измерение скорости счёта импульсов в образце и определение активности в СКМ.

Усовершенствование методов дозиметрии актинидов прежде всего связано с повышением чувствительности методов измерений. Характеристика методов измерений, используемых в лаборатории № 3 в настоящее время, представлена на схеме рис. 1.

Метод измерения на установках СИЧ

Измерение на СИЧ является одним из наиболее эффективных методов определения содержания ^{241}Am в организме у персонала. Метод основан на регистрации γ -излучения с

энергией 59,54 кэВ, сопровождающего α -распад ^{241}Am . Содержание нуклида в органе или ткани рассчитывается с использованием градуировочных коэффициентов. Обнаружение ^{241}Am в лёгких используется как сигнал для дальнейшего проведения дозиметрического контроля с использованием биофизического метода.

Лаборатория № 3 обладает более чем тридцатилетним опытом выполнения *in vivo* измерений [25]. Указанный метод характеризуется высокой пропускной способностью, точностью получаемых результатов и наименьшими финансовыми затратами. С использованием СИЧ выполняется оценка содержания радионуклида в основных органах депонирования: лёгких, печени и костной ткани. Активность ^{241}Am , накопленного в органах депонирования, оценивается путём измерения плотности потока γ -квантов с помощью детекторов, размещённых непосредственно над интересующим органом. Для оценки содержания в костной ткани используются результаты измерения содержания ^{241}Am в костях черепа.

Обследования персонала ФГУП "ПО "Маяк" были начаты в 1980-х годах с использованием установок, оснащённых детекторами на основе кристаллов CsI. В начале 2000 годов в лаборатории № 3 введены в эксплуатацию спектрометры излучения человека с высоким энергетическим разрешением, оснащённые детекторами на основе полупроводниковых детекторов из высокочистого германия (рис. 2).




<ul style="list-style-type: none"> • <u>Анализируемое количество биоматериала</u> аликвота мочи, 500 мл • <u>Предел обнаружения</u> ~4 мБк в аликвоте • <u>Время подготовки и измерений</u> 5 дней <p>Малофоновый альфа-радиометр</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Анализируемое количество биоматериала</u> суточное количество мочи • <u>Предел обнаружения</u> ^{241}Am, ^{238}Pu, $^{239,240}\text{Pu}$, ^{234}U, ^{235}U, ^{238}U - 1 мБк в суточном количестве мочи • <u>Время подготовки и измерений</u> 7 дней <p>Альфа-спектрометр ORTEC OSTETE PC™</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Анализируемое количество биоматериала</u> суточное количество мочи • <u>Предел обнаружения</u> ^{239}Pu - 0,1 мБк, ^{240}Pu - 0,2 мБк, ^{235}U и ^{238}U - 1 мБк в суточном количестве мочи • <u>Время подготовки и измерений</u> 3 дня <p>Масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой</p> 
--	--	---

Рис. 1. Характеристика методов измерений



Рис. 2. СИЧ 7.5

Рассматриваемый метод контроля за- действован при осуществлении как текущего ИДК, так и оперативного и специального ИДК. В ходе последнего определяющим преимуществом является оперативность получения результата контроля, характеризующего факт потенциального радиационного воздействия и его величину. Для выполнения ИДК были разработаны, аттестованы, внедрены и реализуются методики измерения содержания ^{241}Am в лёгких, а также γ -спектрометрический метод измерения активности ^{241}Am и ^{239}Pu при их взаимном присутствии в повреждённой коже человека [26, 27].

Объёмы контроля

С середины 1960-х годов лаборатория № 3 начала выполнять плановые биофизические обследования работников ФГУП "ПО "Маяк". Организация проведения обследований менялась с течением времени: до 1975 г. около 90 % всех обследований выполнялись с использованием хелатостимуляции, независимо от уровней поступления; затем совершен-

ствование методов радиохимического анализа и методов измерения позволило анализировать естественные уровни экскреции плутония. До начала 2000 годов обследование работников проходило в условиях стационара и включало обязательный сбор не менее трёх СКМ. В настоящее время при обследовании собирается только одна проба мочи, сбор происходит амбулаторно, что связано со значительным увеличением количества обследуемых работников: начиная с 2014 г., в лаборатории ежегодно выполняется более 2000 обследований биофизическим методом и более 1800 обследований на установках СИЧ работников разных подразделений ФГУП "ПО "Маяк".

На рис. 3 и 4 представлено распределение обследований, выполненных биофизическим методом и методом измерения на СИЧ соответственно, за всё время функционирования лаборатории № 3.

Особое внимание уделяется процедуре проведения специального (аварийного) ИДК. Случаи острого поступления актинидов фиксируются даже в последние десятилетия. Это работники, сразу направленные на обследо-

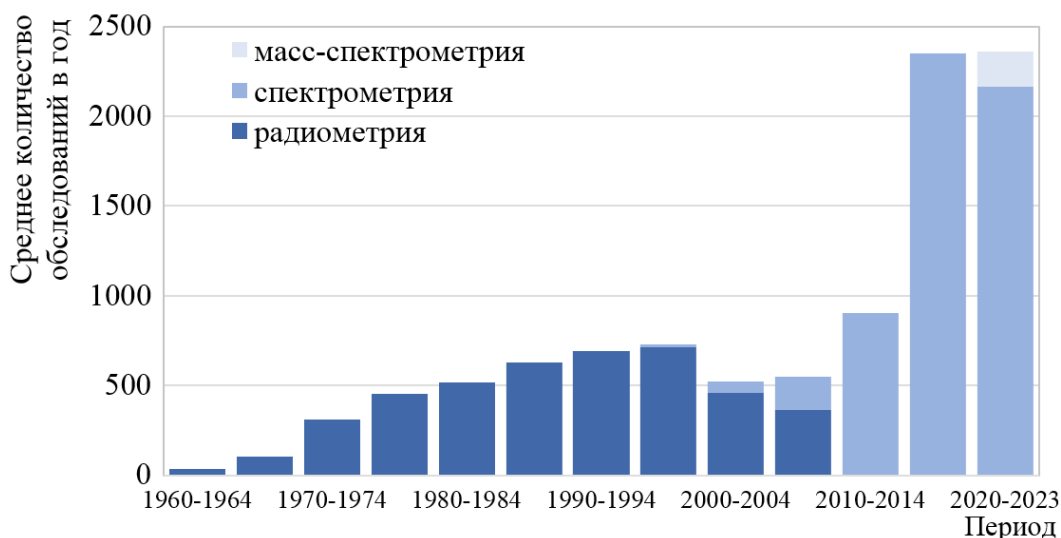


Рис. 3. Динамика объёмов контроля биофизическим методом

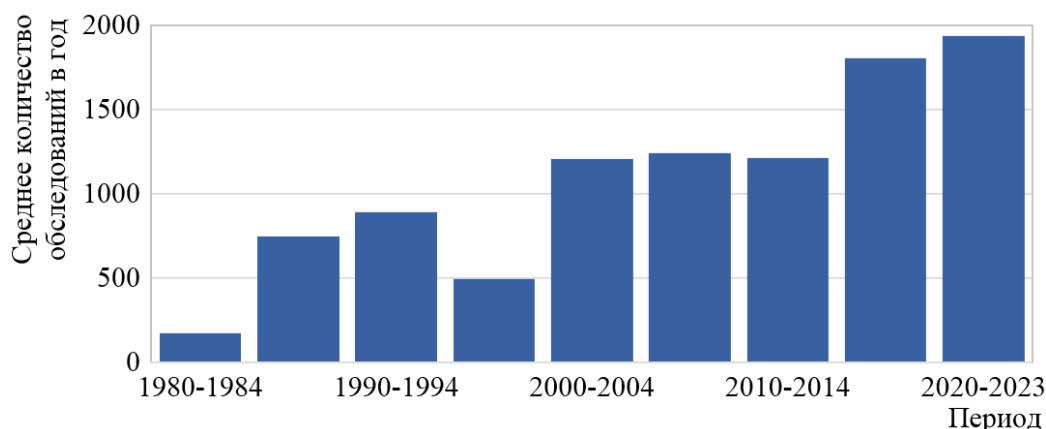


Рис. 4. Динамика объёмов контроля методом измерения на установках СИЧ

ние после возникновения нештатной ситуации, а также случаи, выявленные при проведении текущего ИДК. На рис. 5 представлено распределение аварийных ситуаций/инцидентов с потенциальным и подтверждённым поступлением актинидов в зависимости от года возникновения или обнаружения за период с начала эксплуатации предприятия до настоящего времени.

Начиная с 2021 г., лаборатория № 3 выполняет специальный ИДК для отдельных категорий персонала ФЯО ФГУП "ГХК". Учитывая опыт взаимодействия ФЯО ФГУП "ГХК" с ФГБУН ЮУрИБФ ФМБА России,

начаты работы по созданию на базе ФГБУЗ Клинической больницы № 51 ФМБА России Филиала ФГБУН ЮУрИБФ ФМБА России для решения задачи контроля внутреннего облучения персонала ФЯО ФГУП "ГХК".

НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Развитие и совершенствование системы дозиметрического контроля внутреннего облучения, помимо использования актуальных рекомендаций, требований и руководств таких общепризнанных международных организа-

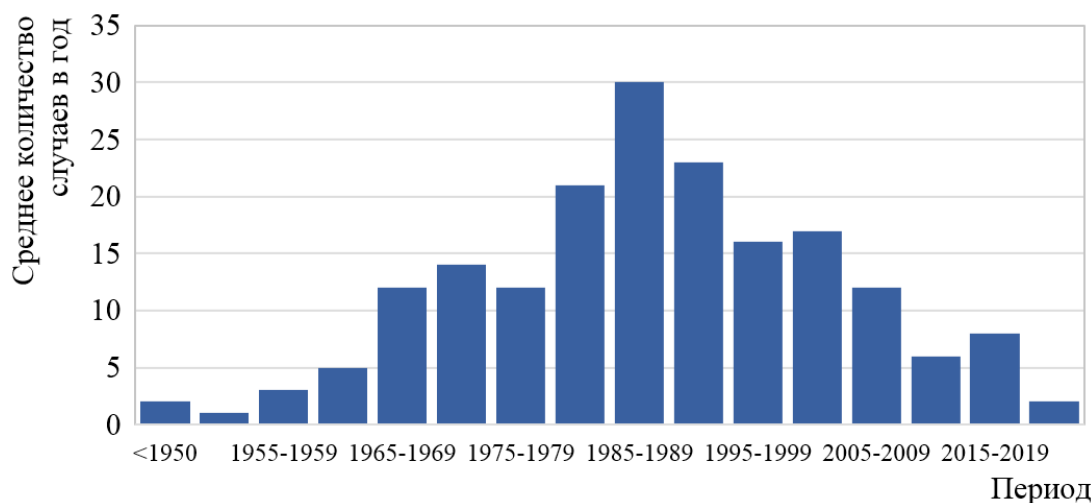


Рис. 5. Распределение аварийных ситуаций/инцидентов с потенциальным и подтверждённым поступлением актинидов в зависимости от года возникновения/выявления

ций-экспертов в области радиационной безопасности как Международная комиссия по радиологической защите (МКРЗ) и Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), опирается и на накопленный научно-практический опыт, сконцентрированный в отечественных научных разработках и методических рекомендациях.

Исследования в области биокинетики, разработки и последовательного совершенствования биокинетических моделей являются приоритетными направлениями работы лаборатории № 3 с начала её деятельность и вплоть до настоящего времени. Накопленные в лаборатории № 3 данные многолетних наблюдений за работниками ФГУП "ПО "Маяк" и населения прилегающих территорий являются ценнейшим источником информации для проведения таких исследований [1, 20, 28]. Для пополнения массива данных о содержании америция и изотопов плутония в тканях и органах профессиональных работников, а также населения прилегающих территорий, выполняется программа аутопсийных исследований для обеспечения дополнительными дозиметрическими данными представителей эпидемиологических когорт, а также в целях получения данных для верификации и развития моделей биокинетики актинидов [4, 7–11, 14, 15]. Распределение количества случаев, органы и ткани которых взяты для

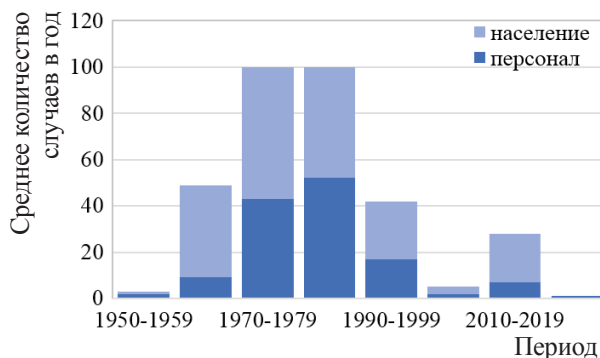


Рис. 6. Количество случаев, органы и ткани которых взяты для исследований при проведении аутопсии, в зависимости от года отбора материала (года смерти)

исследований при проведении аутопсии, в зависимости от года отбора материала (года смерти) представлено на рис. 6.

Первые этапы работы по созданию и совершенствованию дозиметрических систем работников ФГУП "ПО "Маяк" представлены в трёх последовательно подготовленных модификациях: "Дозы-1999", "Дозы-2000" и "Дозы-2005". Задача построения биокинетических моделей состояла в модификации структурных схем биокинетических моделей, рекомендованных МКРЗ, и подгонке параметров обмена

к наблюдаемым данным о распределении и экскреции плутония у работников ФГУП "ПО "Маяк" [1, 28].

В рамках работы по совместному российско-американскому проекту, посвящённому развитию и совершенствованию дозиметрии, были разработаны дозиметрические системы MWDS-2008, MWDS-2013, MWDS-2016 и MWDS-2019 [12, 29, 30].

Одним из важнейших практических

результатов стало повышение качества ретроспективных оценок доз внутреннего облучения, а также увеличение объёма дозиметрических данных, что будет способствовать уточнению коэффициентов радиоканцерогенного риска в изучаемой когорте работников ФГУП "ПО "Маяк", являющейся одной из немногих международно признанных когорт, включённых в исследования радиационно-индуцированных эффектов (рис. 7).

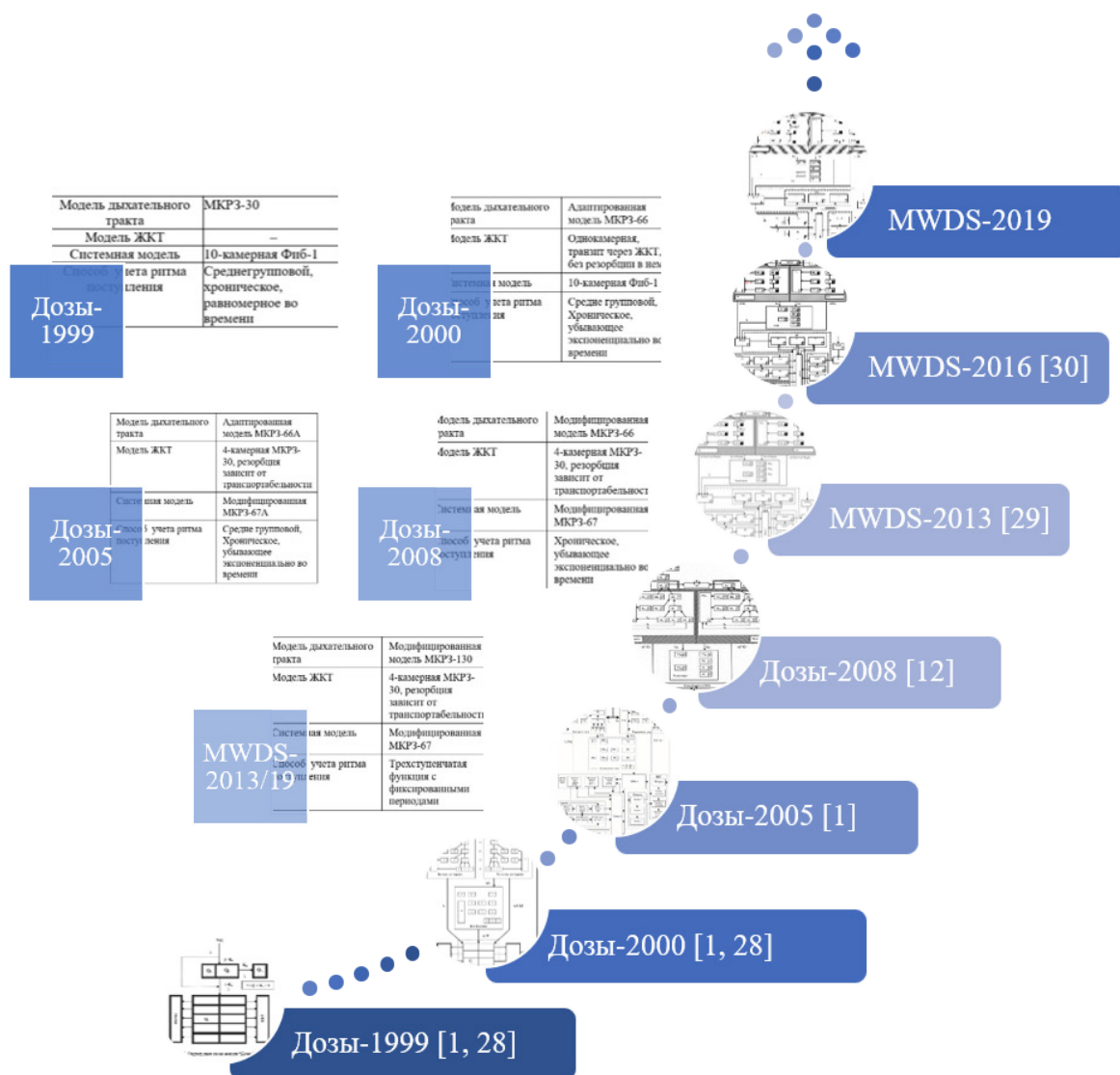


Рис. 7. Развитие и совершенствование дозиметрических систем работников ФГУП "ПО "Маяк"

Разработка и совершенствование нормативной базы радиационной безопасности и дозиметрического контроля также является актуальной областью деятельности лаборатории. В ЮУрИБФ последовательно ведутся работы по совершенствованию методической базы системы ИДК: за последние пять лет специалистами лаборатории № 3 разработано и введено в действие более десяти методических документов в целях решения актуальных проблем системы ИДК (рис. 8).

Всего за период деятельности лаборатории № 3 создано более 400 отчётных и методических документов, опубликовано более 400 статей и монографий, выполнено 10 диссертационных работ (рис. 9а, 9б).

Следует особо отметить, что результаты исследований, проведённых сотрудниками лаборатории № 3, получили широкое признание

мирового научного сообщества: в Публикации 141 серии OIR (the Occupational Intakes of Radionuclides) МКРЗ [31], в которой изложены данные об отдельных элементах и их изотопах, в том числе информация о химических формах, значения параметров биокинетической модели, данные о методах мониторинга радионуклидов, встречающихся в условиях профессионального контакта с источниками ионизирующего излучения, были использованы работы по метаболизму изотопов Pu и ^{241}Am , выполненные специалистами лаборатории № 3 [8, 9, 11, 13, 14, 32–37].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты научно-практической деятельности лаборатории № 3 ЮУрИБФ способствуют развитию организационного

МУ

- МУ 2.6.5.064 – 2018. «Определение объема контроля при осуществлении ИДК профессионального внутреннего облучения».
- МУ 2.6.5.071 – 2018. «Порядок выполнения ретроспективных оценок доз внутреннего облучения персонала ФГУП «ПО «Маяк», обусловленных поступлением плутония с 1949 по 1999 годы».

МВИ

- «Экспресс-методика определения суммарной бета-активности в пробах биосубстратов» (Свидетельство о метрологической аттестации RA.RU.311952-2018, выдано ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.А. Забабахина).
- СП-21-3-2021. «Методика измерений плутония-239, 240 и изотопов урана-235, 238 в биологических пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой» (Свидетельство о метрологической аттестации № СП-21-3-RA.RU.311952-2021, выдано ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академика Е.А. Забабахина).

МР

- МР ФМБА 17.065 – 2018. «Выполнение эффективного курса комплексотерапии при остром поступлении актинидов в организм».
- МР ФМБА России 12.070 – 2018. «Организация индивидуального обследования и реконструкция условий облучения для выполнения ретроспективных оценок доз внутреннего облучения за счет работы на производствах ФГУП «ПО «Маяк» в период с 1949 по 1999 годы».
- МР ФМБА России 17.067 – 2018. «ИДК внутреннего облучения различных групп персонала литейно-механического отделения. Содержание и объем контроля».

Рис. 8. Методические документы, разработанные в лаборатории № 3

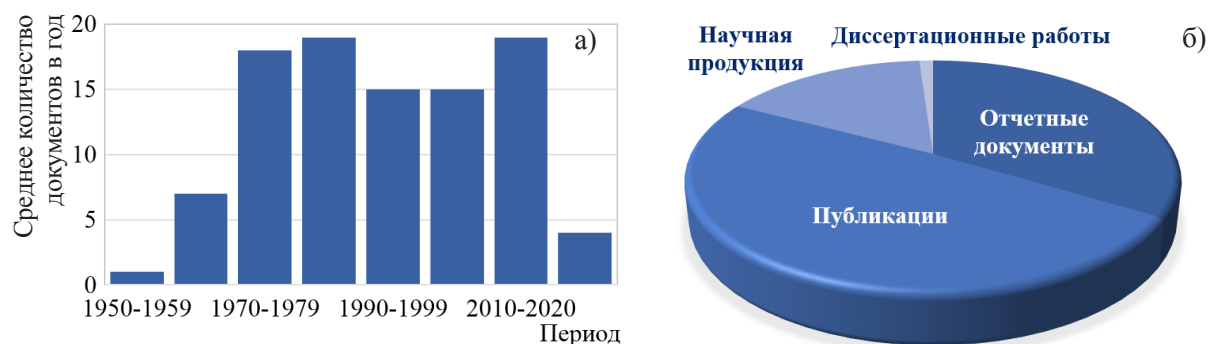


Рис. 9. Результаты научной деятельности лаборатории № 3 (а), структура научной продукции (б)

и методического обеспечения системы индивидуального дозиметрического контроля профессионального внутреннего облучения и созданию единой методической базы дозиметрии профессионального внутреннего облучения. Внедрение в системе ФМБА России разработанных в ЮУриБФ и с привлечением специалистов ЮУриБФ методик контроля ведёт к повышению эффективности и достоверности результатов ИДК внутреннего облучения персонала, занятого обращением с плутонием, и оптимизации системы ИДК с учётом актуальных требований международных стандартов и рекомендаций.

Авторы выражают благодарность и глубокую признательность всем сотрудникам лаборатории № 3 ЮУриБФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хохряков В.Ф., Хохряков В.В., Суслова К.Г. и др. Достижения в области разработок дозиметрии плутония на ПО "Маяк" // Вопросы радиац. безопасности. – 2006. – № 1. – С. 36–57.
2. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. – Ann. ICRP 37 (2–4).
3. Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Aladova E.E. et al. Development of an improved dosimetry system for the workers at the Mayak Production Association // Health Physics. – 2000. – V. 79. – P. 72–76.
4. Suslova K.G., Khokhryakov V.F., Tokarskaya Z.B. et al. The effect of state of health on organ distribution and excretion of systemic plutonium in the Mayak workers // Radiat. Prot. Dosimetry. – 2003. – V. 105. – P. 229–233.
5. Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Vostrotin V.V. et al. Adaptation of the ICRP Publication 66 respiratory tract model to data on plutonium biokinetics for Mayak workers // Health Physics. – 2005. – V. 88. – P. 125–132.
6. Khokhryakov V.F., Khokhryakov V.F., Suslova K.G. et al. Status and prospects of internal dosimetry for the Mayak nuclear workers // Int. J. of Low Radiation. – 2006. – V. 2. – P. 219–235.
7. Suslova K.G., Khokhryakov V.F., Tokarskaya Z.B. et al. Modifying effects of health status, physiological, and dosimetric factors on extrapulmonary organ distribution and excretion of inhaled plutonium in workers at the Mayak Production Association // Health Physics. – 2006. – V. 90. – P. 299–311.
8. Suslova K.G., Sokolova A.B., Krahenbuhl M.P., Miller S.C. The effects of smoking and lung health on the organ retention and distribution of different plutonium compounds in the Mayak PA workers // Radiation Research. – 2009. – V. 171. – P. 302–309.
9. Suslova K.G., Sokolova A.B., Khokhryakov V.V., Miller S.C. Plutonium-238: Accumulation, tissue distribution and excretion in Mayak workers after exposure to plutonium aerosols // Health Physics. – 2012. – V. 102. – P. 243–250.
10. Suslova K.G., Khokhryakov V.F., Sokolova A.B., Miller S.C. Plutonium-238: A review of the biokinetics, dosimetry and implications for human exposures // Health Physics. – 2012. – V. 102. – P. 251–262.



Коллектив лаборатории № 3 (1980 г.)



Сотрудники лаборатории № 3 (2023 г.)

11. Suslova K.G., Sokolova A.B., Efimov A.V., Miller S.C. Accumulation, organ distribution, and excretion kinetics of ^{241}Am in Mayak Production Association workers // *Health Physics*. – 2013. – V. 104. – P. 313–324.
12. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G. et al. Mayak worker dosimetry system 2008 (MWDS-2008): assessment of internal dose from measurement results of plutonium activity in urine // *Health Physics*. – 2013. – V. 104. – P. 366–378.
13. Sokolova A.B., Suslova K.G., Khokhryakov V.F. et al. Development of an inhalation intake model for ^{241}Am based on Mayak Production Association worker data // *Health Physics*. – 2013. – V. 105. – P. 21–30.
14. Sokolova A.B., Suslova K.G., Efimov A.V., Miller S.C. Use of in vivo counting measurements to estimate internal doses from ^{241}Am in workers from the Mayak Production Association // *Health Physics*. – 2014. – V. 107. – P. 135–142. –DOI: 10.1097/HP.0000000000000081.
15. Suslova K.G., Romanov S.A., Efimov A.V. et al. Dynamics of body burdens and doses due to internal irradiation from intakes of long-lived radionuclides by residents of Ozyorsk situated near Mayak PA // *J. of Radiological Protection*. – 2015. – V. 35(4). – P. 789–818.
16. Sokolova A.B., Suslova K.G., Miller S.C. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): Estimate of Pu content in lungs and thoracic lymph nodes from a limited set of organ autopsy samples // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2017. – V. 176 (1-2). – P. 132–143. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw218>
17. Sokolova A.B., Birchall A., Efimov A.V. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): Determination of the individual scenario of inhaled plutonium intake in the Mayak workers // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2017. – V. 176 (1-2). – P. 83–89. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw190>
18. Vostrotin V.V., Birchall A., Zhdanov A. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): Internal dosimetry results // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2017. – V. 176 (1-2). – P. 190–201. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw268>
19. Sokolova A.B., Suslova K.G., Miller S.C. Urinary excretion of plutonium in Mayak workers during and after Ca-DTPA administration // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2021. – V. 197 (2–4). – P. 154–162.
20. Хохряков В.Ф., Василенко Е.К. Дозиметрический регистр персонала ПО "Маяк" – один из важнейших мировых источников информации для решения фундаментальных задач радиационной защиты // *Вопросы радиац. безопасности*. – 2003. – Спецвыпуск (к 50-летию ЮУрИБФ). – С. 36–40.
21. Голутвина М.М., Абрамов Ю.В. Контроль за поступлением радиоактивных веществ в организме человека и их содержанием / Под ред. Л.А. Булдакова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
22. Плутоний. Экспресс-метод определения альфа-активности в пробах мочи (Свидетельство об аттестации № 40090.4Г974, выдано ГНМЦ ВНИИФТРИ 30.03.2004).
23. Методика выполнения измерения активности изотопов плутония, америция, урана и тория в биосубстратах на спектрометре альфа-излучения "Ortec Octete PCTM" (Свидетельство об аттестации № 40090.5Н304, выдано ФГУП ВНИИФТРИ 18.11.2005).
24. Методика измерений активности изотопов плутония-239, 240 и изотопов урана-235, 238 в биологических пробах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (Свидетельство об аттестации МИ № СП-21-3-RA.RU.311952-2021).
25. Хохряков В.В., Ефимов А.В. Опыт применения установок СИЧ для контроля содержания ^{241}Am в организме работников ПО "Маяк" // *Вопросы радиац. безопасности*. – 2004. – № 1. – С. 57–70.
26. МВИ "Америций-241. Определение активности в лёгких методом измерения на установке СИЧ 7.5" (Свидетельство об аттестации МВИ № 40090.4В337 от 19.03.2004 выдано ЦМПИ ФГУП "ВНИИФТРИ").
27. МВИ "Гамма-спектрометрический метод измерения активности америция-241 и плутония-239 при их взаимном присутствии в повреждённой коже человека" (свидетельство об аттестации МВИ № 40090.8Н642 от 28.11.2008 выдано ЦМПИ ФГУП "ВНИИФТРИ").
28. Хохряков В.Ф. "Дозы-1999, 2000" – последовательное совершенствование плутониевой дозиметрии персонала ПО "Маяк" // *Вопросы радиац. безопасности*. – 2004. – № 1. – С. 71–82.
29. Vostrotin V.V., Birchall A., Zhdanov A. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013): Internal dosimetry results // *Radiat. Prot.*

- Dosimetry. – 2017. – V. 176 (1-2). – P. 190–201. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncw268>
30. Vostrotin V.V., Zhdanov A., Sokolova A.B. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2016): Internal dosimetry results and comparison with MWDS-2013 // Radiat. Prot. Dosimetry. – 2019. – V. 184 (2). – P. 201–210.
31. ICRP, 2019. Occupational intakes of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 141. – Ann. ICRP 48 (2/3).
32. Khokhryakov V.F., Menshikh Z.S., Suslova K.G. et al. Plutonium excretion model for the healthy man // Radiat. Prot. Dosimetry. – 1994. – V. 53. – P. 235–239.
33. Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Tsevelyova I.A. et al. Classification of alpha-active workplace aerosols based on coefficient of transportability as measured by the dialysis method // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 1998. – V. 234. – P. 209–212.
34. Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Filipy R.E. et al. Metabolism and dosimetry of actinide elements in occupationally exposed personnel of Russia and the United States: a summary progress report // Health Physics. – 2000. – V. 79. – P. 63–71.
35. Suslova K.G., Filipy R.E., Khokhryakov V.F. et al. Comparison of the dosimetry registry of the Mayak Industrial Association and the United States Transuranium and Uranium Registries: a preliminary report // Radiat. Prot. Dosimetry. – 1996. – V. 67. – P. 13–22.
36. Suslova K.G., Khokhryakov V.F., Tokarskaya Z.B. et al. Extrapulmonary organ distribution of plutonium in healthy workers exposed by chronic inhalation at the Mayak Production Association // Health Physics. – 2002. – V. 82. – P. 432–444.
37. Tseveleva I.A., Yerokhin R.A. Behavior of americium-241 in the body of rats under intraperitoneal and intratracheal administration. In: Moskalov, Y. (Ed.), Radioactive Isotopes and the Body. Translated in AEC-tr-7195. – 1969. – US Atomic Energy Commission, Germantown, MD. – P. 161–167.

УДК 621.039.73

© 2023

МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗОНЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПО "МАЯК"

Е.Е. Аладова, А.И. Алдошин, Л.В. Финашов, В.А. Маров, Е.В. Романов
Россия, г. Озёрск, ФГБУН Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России

Представлены результаты регулярно проводимой маршрутной γ -съемки местности в населённых пунктах и территориях, расположенных в 30-километровой зоне влияния ПО "Маяк", полученные в период с 2016 по 2021 гг. *Материалы и методы:* с помощью передвижной радиологической лаборатории, оснащённой дозиметрической установкой "Гамма-Сенсор", выполнены измерения мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) в населённых пунктах и опорных точках разработанных маршрутов обследования территорий с привязкой к географическим координатам, проведён регрессионный линейный анализ зависимости МАЭД от интенсивности спектров γ -излучения идентифицированных радионуклидов и расстояния от ПО "Маяк". *Результаты:* среднегодовые значения МАЭД находились в пределах 0,07–0,12 мкЗв/ч, при среднем значении 0,09 мкЗв/ч, и соответствовали естественному γ -фону, присущему данной местности. Максимальные значения МАЭД, превышающие допустимый уровень мощности эквивалентной дозы γ -излучения на открытой местности для населения, зафиксированы при пересечении моста через р. Течу, в которую в первые годы работы предприятия сбрасывались радиоактивные отходы. В спектре γ -излучения с привязкой к географическим координатам идентифицированы радионуклиды: ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K , ^{137}Cs . Отмечается, что в начале весеннего снеготаяния основной вклад в МАЭД статистически значимо вносил ^{137}Cs , связанный с глобальными выпадениями, при этом количество импульсов в пике полного поглощения ^{137}Cs умеренно коррелировало с расстоянием от ПО "Маяк". После начала вегетационного периода появилась заметная обратная корреляционная связь с расстоянием от ПО "Маяк" и количеством импульсов в каналах ^{137}Cs , что, вероятно, связано с присутствием техногенного цезия. *Выводы:* зарегистрированные значения МАЭД на обследованных территориях находились в пределах колебаний естественного γ -фона, характерного для данной местности за последние 10 лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ; МОЩНОСТЬ ДОЗЫ γ -ИЗЛУЧЕНИЯ; γ -СЪЁМКА МЕСТНОСТИ; ЦЕЗИЙ; РАДИАЦИОННЫЙ ФОН; СПЕКТР γ -ИЗЛУЧЕНИЯ; РАДИОНУКЛИДЫ

Мониторинг радиационной обстановки в регионах расположения объектов ядерного наследия, к которым относится ПО "Маяк", является одним из наиболее важных инструментов реализации Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу, утверждённых в 2018 году ¹.

Как известно, радиационная обстановка в зоне влияния ПО "Маяк" сформировалась в ранние годы на этапе освоения производства в результате газоаэрозольных выбросов предприятия в атмосферу, сбросов радионуклидов в речную систему Теча – Исеть, радиационной аварии 1957 года, ветрового переноса радионуклидов с берегов хранилища радиоактивных отходов – озера Карачай.

¹ Указ Президента Российской Федерации от 13.10.2018 № 585 "Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу".

В настоящее время радиоактивное загрязнение территории в районе предприятия определяется в основном ^{90}Sr , ^{137}Cs и, в значительно меньшей степени, плутонием, что обуславливает долговременный характер радиационного воздействия [1].

Специалисты Южно-Уральского института биофизики в рамках выполнения госконтрактов, финансируемых ФМБА России, в течение последних шести лет проводят систематические наблюдения за параметрами радиационной обстановки на территории санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и в зоне наблюдения (ЗН) ПО "Маяк".

С помощью передвижной радиологической лаборатории (ПРЛ), оснащённой приборами радиационного контроля, осуществляется γ -съёмка местности, т. е. регулярно проводятся измерения параметров радиационной обстановки на местности с географической привязкой данных измерений, причём ПРЛ может использоваться как для повседневного мониторинга объектов окружающей среды, так и для оперативной радиационной разведки в условиях радиационной аварии [2–4].

Гамма-съёмка местности позволяет выявить изменения радиационного фона, определить участки радиоактивного загрязнения, их границы и состав загрязнения. В случае радиационной аварии эта информация будет необходима для разработки плана санитарно-гигиенических мероприятий по минимизации доз облучения населения [5–6].

Цель исследования: представить результаты измерений мощности амбиентного эквивалента дозы γ -излучения (МАЭД), выполненных в период с 2016 по 2021 гг. при маршрутной γ -съёмке в населённых пунктах и территориях, расположенных в 30-километровой зоне влияния ПО "Маяк", для отслеживания динамики изменения радиационного фона на местности, а также оперативного выявления признаков развития возможных аварийных ситуаций на разработанных маршрутах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ПРЛ оснащена дозиметрической установкой "Гамма-Сенсор" с компьютерной программой "Сенсор 4.2.5.496" (свидетельство о повер-

Таблица 1

Технические характеристики дозиметрической установки "Гамма-Сенсор"

Наименование	Характеристика
Диапазон измерения МАЭД γ -излучения	от 0,1 до 3 мкЗв/ч
Диапазон энергии регистрируемого γ -излучения	от 50 до 3000 кэВ
Предел допускаемой основной относительной погрешности измерений МАЭД	$\pm 15\%$
Время непрерывной работы	не менее 24 ч

ке №С-СЕ/24-05-2021/67753969 от 24.05.2021).

Технические характеристики дозиметрической установки "Гамма-Сенсор" представлены в табл. 1.

Установка предназначена для измерения операционной дозиметрической величины – мощности амбиентного эквивалента дозы, являющейся консервативной оценкой нормируемой величины – эффективной дозы. Значение амбиентной дозы показывает дозу, которую получил бы человек, если бы он находился на месте, где проводится измерение.

Кроме того, установка позволяет оценивать вклад в дозу γ -излучения различных радионуклидов, а также осуществлять навигацию и привязку к местности с помощью спутниковой навигационной системы [3].

Наглядное изображение вклада излучения радионуклидов в МАЭД осуществляется с помощью "дозового спектра", отображаемого в режиме работы со спектрометрическим блоком. "Дозовый спектр" представляет собой функцию, описывающую распределение долей МАЭД, вносимых γ -квантами различных энергетических групп, по энергии.

Перед началом обследования выбранного участка территории с использованием топографической карты, охватывающей район обследования, готовилась карта-схема и намечался маршрут обследования с населёнными пунктами и опорными точками, в которых проводились измерения мощности дозы. Геометрия маршрутов была как линейной (от одной точки на местности к другой), так и круговой (по внешнему контуру территории).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Систематический радиационный мониторинг уровней мощности амбиентного эквивалента дозы γ -излучения на исследуемых территориях позволяет накапливать оперативные сведения о динамике радиационной обстановки в наблюдаемых населённых пунктах, расположенных в зоне влияния ПО "Маяк".

На рис. 1 представлен общий план маршрута, по которому выполнялись измерения мощности дозы γ -излучения в 2020 г., с нанесёнными значениями МАЭД в точках измерений.

Анализ результатов измерений показал, что максимальные значения МАЭД не превышали 0,14 мкЗв/ч, а среднее значение составило 0,09 мкЗв/ч, что соответствует средним многолетним значениям.

На рис. 2 представлена картограмма с результатами измерений МАЭД на участке маршрута в районе р. Течи от п. Карагайкуль до п. Смольное. Как и в предыдущие годы, максимальное значение МАЭД зафиксировано в точке на мосту через р. Течу, которое составило 0,87 мкЗв/ч, что превышает допустимый уровень мощности эквивалентной дозы γ -излучения на открытой местности для населения (0,3 мкЗв/ч).

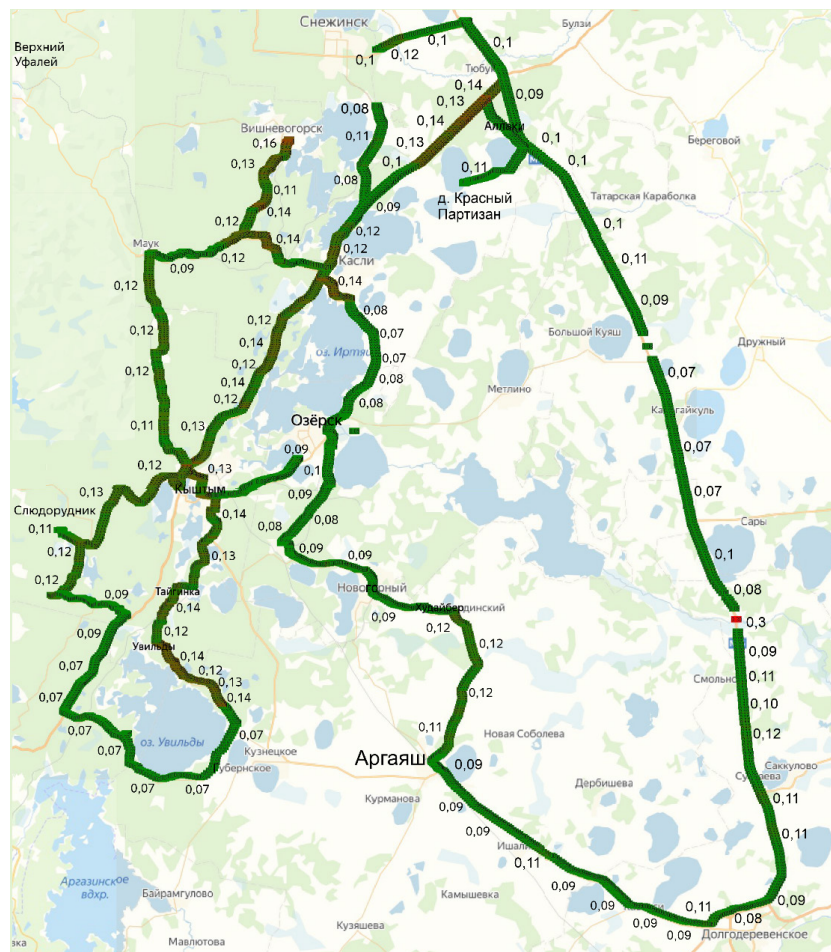


Рис. 1. Общий план маршрута движения ПРЛ 31.07.2020.
Значения МАЭД: минимальное – 0,07 мкЗв/ч, максимальное – 0,14 мкЗв/ч, среднее – 0,09 мкЗв/ч

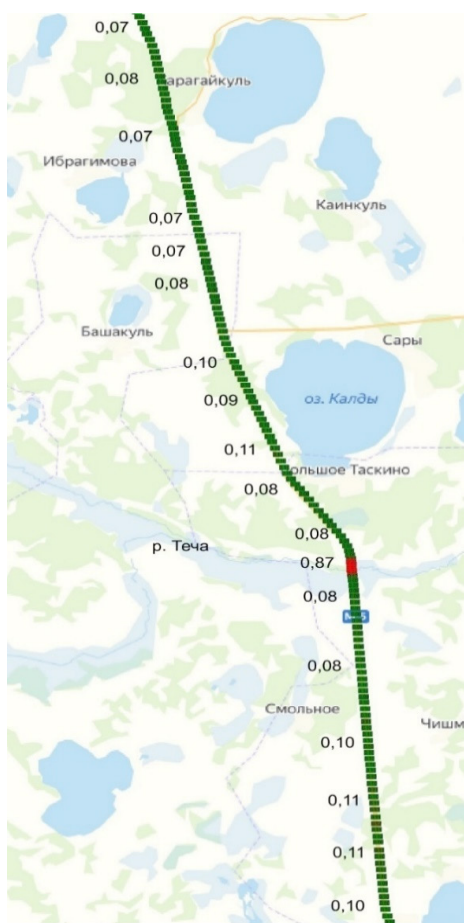


Рис. 2. Картограмма МАЭД участка маршрута движения ПРЛ в районе р. Течи. Дата γ -сканирования 31.07.2020. Значения МАЭД: минимальное – 0,07 мкЗв/ч, максимальное – 0,87 мкЗв/ч, среднее – 0,14 мкЗв/ч

Повышенный фон γ -излучения является следствием радиоактивного загрязнения реки при сбросе в неё жидких радиоактивных отходов ПО "Маяк" в первые годы работы предприятия.

Непосредственно на мосту через р. Течу было выполнено девять измерений, при этом величина МАЭД изменялась в диапазоне 0,23–0,87 мкЗв/ч, среднее значение составило 0,54 мкЗв/ч (рис. 3). В точке, расположенной на расстоянии 125 м от береговой линии р. Течи (на рис. 3 обозначена жёлтым цветом), портативным многофункциональным спектро-

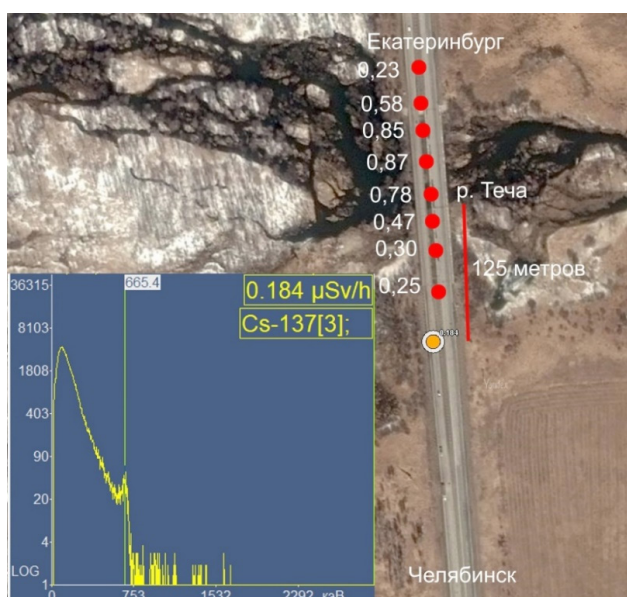


Рис. 3. Картограмма МАЭД участка маршрута движения ПРЛ в районе моста через р. Течу. Дата γ -сканирования 31.07.2020. Значения МАЭД: минимальное – 0,23 мкЗв/ч, максимальное – 0,87 мкЗв/ч, среднее – 0,54 мкЗв/ч

метром МКС-АТ6102 в режиме реального времени выполнен анализ спектрального состава γ -излучения и идентифицирован радионуклид ^{137}Cs . При этом мощность дозы γ -излучения на местности в этой точке составила 0,184 мкЗв/ч.

На других участках маршрута в 2020 г. (рис. 1 и 2) при проведении измерений МАЭД превышений значений естественного радиационного фона, присущего данной местности, не обнаружено.

Обобщённые результаты измерений радиационного фона на местности за 2020 г. представлены в табл. 2.

Из данных табл. 2 видно, что в 2020 г. радиационный фон на местности характеризовался значениями МАЭД в 17 пунктах наблюдения 30-километровой зоны ПО "Маяк" в диапазоне 0,07–0,54 мкЗв/ч при среднем значении 0,11 мкЗв/ч, что соответствует уровню естественного γ -фона Уральского региона за последние 10 лет [1, 7].

Таблица 2

Значения МАЭД в населённых пунктах по маршруту радиационного обследования в 2020 г., мкЗв/ч

п/п	Населённый пункт	Кол-во точек измерений	Среднее значение МАЭД	Максимальное значение МАЭД
1	п. Татыш	4	0,09	0,13
2	г. Озёрск	8	0,10	0,14
3	п. Новая Теча	3	0,09	0,10
4	г. Касли	3	0,08	0,10
5	п. Новогорный	4	0,09	0,10
6	п. Метлино	6	0,08	0,10
7	д. Сарыкульмяк	5	0,09	0,12
8	г. Кыштым	4	0,08	0,12
9	п. Каолиновый	5	0,09	0,13
10	п. Слюдорудник	4	0,09	0,13
11	д. Ишалино	1	0,11	0,11
12	г. Снежинск	3	0,08	0,12
13	п. Маук	5	0,08	0,12
14	г. Верхний Уфалей	2	0,09	0,10
15	г. Вишневогорск	4	0,08	0,10
16	Мост через р. Теча	9	0,54	0,87
17	с. Аргаяш	4	0,09	0,10
	Среднее по 30-км зоне	74	0,11	0,87

В 2021 г. контроль МАЭД на местности осуществлялся при движении по маршруту, представленному на рис. 4. По данным наблюдений, значения МАЭД изменялись от 0,07 до 0,14 мкЗв/ч, среднее значение составило 0,10 мкЗв/ч. В районе моста через р. Течу зафиксировано максимальное значение МАЭД, равное 0,31 мкЗв/ч (рис. 5).

В табл. 3 приводятся обобщённые данные мониторинга радиационного фона на местности в 30-километровой зоне наблюдения ПО "Маяк" за период с 2016 по 2021 гг.

Значения МАЭД находились в пределах 0,07–0,12 мкЗв/ч, при среднем значении 0,09 мкЗв/ч, и соответствовали уровню естественного γ -фона, характерного для данной местности.

Установленная на дозиметрическом оборудовании компьютерная программа при обработке спектра γ -излучения позволяет получить оценочную информацию о радиоактивных

нуклидах, содержащихся в почве в количествах, сравнимых с содержанием естественных радионуклидов.

Программа "Сенсор" автоматически идентифицирует ряд естественных радионуклидов и регистрирует в базе данных численное значение условной площади спектра в области пика полного поглощения данного радионуклида.

Эффективность определения радионуклидного состава зависит от скорости движения автомобиля по обследуемой территории, поэтому для качественной идентификации нуклидного состава проводилась точечная γ -съёмка местности с остановкой ПРЛ в зоне "видимости" источника детектором.

При радиационном обследовании территории по разработанным маршрутам весной 2021 г. с привязкой к географическим координатам были идентифицированы естественные радионуклиды: ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K и ^{137}Cs (рис. 6). Естественные радионуклиды являются посто-

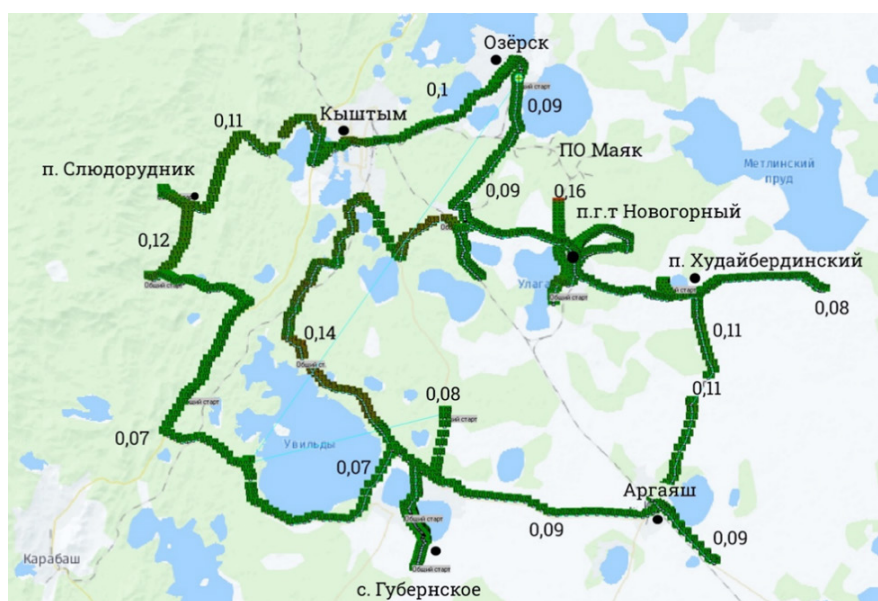


Рис. 4. Общий план маршрута движения ПРЛ 03.06.2021. Значения МАЭД: минимальное – 0,07 мкЗв/ч, максимальное – 0,14 мкЗв/ч, среднее – 0,10 мкЗв/ч

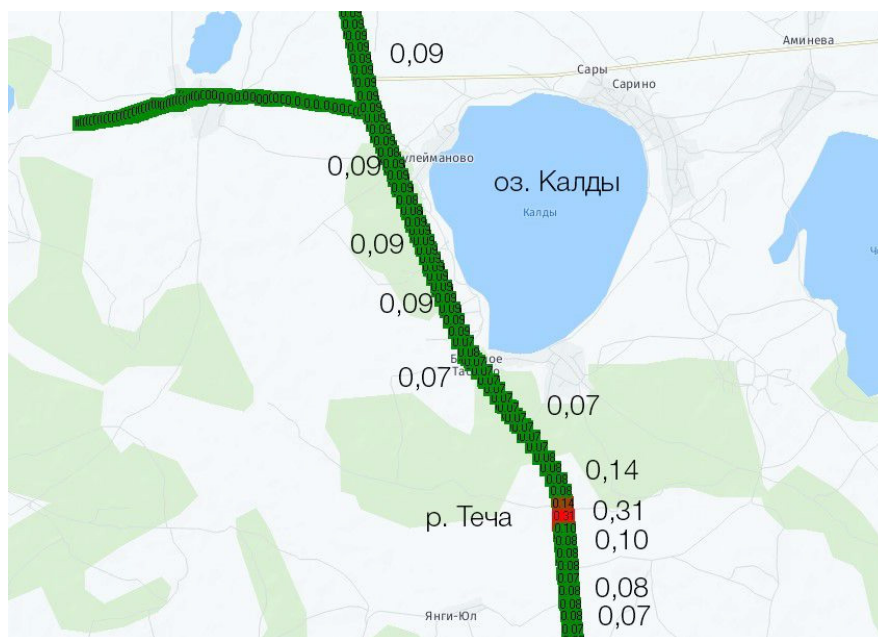


Рис. 5. Картограмма МАЭД участка дороги Екатеринбург – Челябинск в районе р. Теча по результатам γ -сканирования в 2021 г. Значения МАЭД: минимальное – 0,07 мкЗв/ч, максимальное – 0,31 мкЗв/ч, среднее – 0,11 мкЗв/ч

Таблица 3

Среднегодовые значения МАЭД в 30-километровой зоне наблюдения
ПО "Маяк" за период 2016–2021 гг., мкЗв/ч

п/п	Населённый пункт	Расстояние до ПО "Маяк", км	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1	п. Татыш	5	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,12
2	г. Озерск	10	0,10	0,07	0,09	0,09	0,10	0,08
3	п. Новая Теча	10	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,09
4	п. Новогорный	10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,09
5	г. Кыштым	10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
6	п. Каолиновый	10	–	–	0,07	0,08	0,07	0,07
7	д. Сарыкульмяк	10	0,08	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
8	п. Метлино	20	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,08
9	д. Соболева	20	0,08	0,08	0,08	0,08	–	0,08
11	д. Халитово	20	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07	0,07
12	д. Султаева	20	0,08	0,08	0,08	0,08	–	0,08
13	п. Слюдорудник	20	–	–	0,08	0,08	0,08	0,08
14	г. Касли	20	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
15	г. Снежинск	30	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08
16	п. Маук	30	0,07	0,07	–	–	0,07	0,07
17	г. Верхний Уфалей	30	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	–
18	п. Худайбердинский	30	0,10	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11
19	п. Аргаяш	30	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10
20	д. Ибрагимова	30	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
21	д. Карагайкуль	30	0,08	0,08	0,08	0,09	–	0,08
22	п. Увильды	30	–	–	–	–	–	0,09
23	д. Аллаки	30	–	–	–	–	–	0,09
24	д. Кунашак	>30	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08
25	д. Тюбук	> 30	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
26	д. Малый Куяш	> 30	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08
27	д. Смольное	> 30	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
28	п. Губернское	> 30	–	–	–	–	–	0,09
29	с. Долгодеревенское	>30	0,07	0,07	0,09	–	–	–
30	г. Карабаш	> 30	0,10	0,09	0,10	0,11	0,09	0,11
	Среднее по 30-километровой зоне		0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09

янно существующим источником γ -излучения, их радиационное воздействие распространяется в зависимости от свойств самих нуклидов и климатических факторов.

По данным, полученным в ходе измерений

во время двух экспедиций, одна из которых была проведена в начале периода весеннего снеготаяния (конец марта 2021 г.), когда снежный покров ещё сохранялся, вторая – в начале вегетационного периода (начало мая 2021 г.),

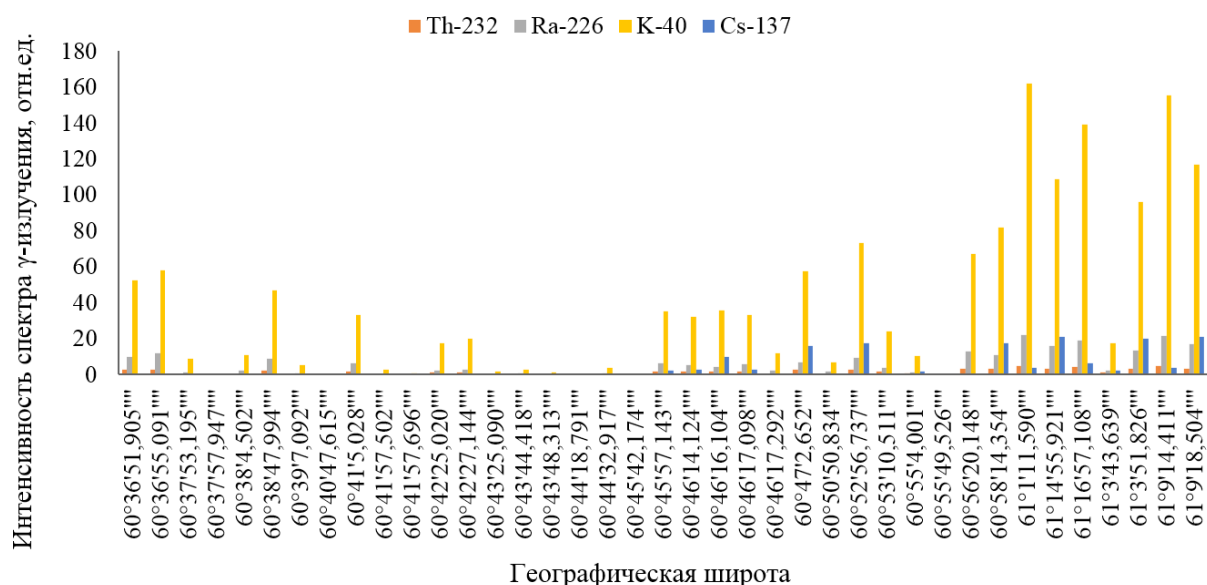


Рис. 6. Интенсивность спектра γ -излучения радионуклидов, идентифицированных при γ -съёмке местности, в зависимости от географической широты

исследовали пространственное распределение идентифицированных радионуклидов относительно ПО "Маяк".

Известно, что снежный покров аккумулирует на себе твёрдые частицы из атмосферы, в том числе и радионуклиды, в течение всего зимнего периода, поэтому снег можно использовать в качестве индикатора загрязнения при контроле радиоактивного фона воздушной среды [8, 9].

Регрессионный линейный анализ зависимости МАЭД от интенсивности спектров γ -излучения идентифицированных радионуклидов показал, что в начале весеннего снеготаяния основной вклад в МАЭД статистически значимо вносил лишь ^{137}Cs , коэффициент корреляции Спирмена составил 0,36, $p < 0,05$, при этом количество импульсов в пике полного поглощения ^{137}Cs (mBa-137 661,7 кэВ) умеренно коррелировало с расстоянием от ПО "Маяк" (коэффициент корреляции Спирмена 0,37, $p < 0,05$). Увеличение количества импульсов в пиках полного поглощения ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K приводило к увеличению количества импульсов в каналах ^{137}Cs . Можно предположить, что возрастание импульсов в каналах цезия с увеличе-

нием расстояния от ПО "Маяк", отмеченное в период начала снеготаяния, скорее всего, связано с глобальными выпадениями ^{137}Cs и других радионуклидов.

После начала вегетационного периода количество импульсов в каналах ^{137}Cs перестало вносить заметный вклад в МАЭД и не зависело от количества импульсов в пиках полного поглощения ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K . Однако появилась заметная обратная корреляционная связь с расстоянием от ПО "Маяк" и количеством импульсов в каналах ^{137}Cs (коэффициент корреляции Спирмена -0,72, $p < 0,0005$), что, вероятно, указывает на присутствие техногенного ^{137}Cs , образовавшегося в результате деятельности ПО "Маяк" и прочно зафиксированного в почве, в отличие от глобального ^{137}Cs , поступающего из атмосферы с осадками, с последующим его испарением и обратным поступлением в атмосферу.

Полученные результаты являются предварительными, для подтверждения выявленных закономерностей в настоящее время разрабатывается поэтапная программа мониторинговых работ на исследуемых территориях с целью накопления достаточного объёма данных наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований радиационной обстановки на изученных территориях в 30-километровой зоне влияния ПО "Маяк" в период 2016–2021 гг. радиационная обстановка была стабильной.

Среднегодовые значения МАЭД находились в пределах 0,07–0,12 мкЗв/ч, при среднем значении 0,09 мкЗв/ч, и соответствовали уровню естественного γ -фона Уральского региона.

Максимальное значение МАЭД 0,87 мкЗв/ч зарегистрировано летом 2020 г. в районе моста через р. Течу, которая находится в зоне радиоактивного загрязнения. В остальных точках за весь период наблюдений значения МАЭД находились в пределах колебаний естественного γ -фона, присущего данной местности.

При проведении γ -съёмки местности идентифицированы естественные радионуклиды ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K , а также ^{137}Cs .

Финансирование осуществлялось ФМБА России в рамках выполнения Государственного задания по прикладной научно-исследовательской работе: "Совершенствование методов контроля и изучение особенностей формирования доз внутреннего облучения персонала ФГУП "ПО "Маяк" и населения прилегающих территорий" (шифр: "Луч-22").

ЛИТЕРАТУРА

1. Мокров Ю.Г., Исаева Н.Б., Яркова Т.А. Результаты контроля радиационной обстановки на территории зоны наблюдения ФГУП "ПО "Маяк" в 2021 году // Вопросы радиац. безопасности. – 2022. – № 2 (106). – С. 16–24.
2. Алдошин А.И., Аладова Е.Е., Василенко Е.К. и др. Современное состояние дел в области исследований и мероприятий для развития и организации реагирования на радиационные аварии и инциденты в системе ФМБА России // Вопросы радиац. безопасности.

– 2018. – № 3 (91). – С. 39–49.

3. Развитие систем аварийного реагирования и радиационного мониторинга / Труды ИБРАЭ. Вып. 15. / Под общ. ред. Большова Л.А. – М.: Наука, 2014. – 315 с.

4. Дровников В.В., Егоров Н.Ю., Живун В.М. и др. Применение γ -спектрометрических технологий в автомобильной γ -съёмке местности в окрестностях АЭС РФ // АНРИ. – 2022. – № 2 (109). – С. 14–25.

5. Лысенко И.А. Вопросы применения средств контроля радиационной обстановки территориальных автоматизированных систем контроля радиационной обстановки. В кн. Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности / Сборник тезисов докладов материалов международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 741–749.

6. Попов Е.В., Воронов О.С. Использование мобильных средств комплексной системы мониторинга за состоянием защиты населения при радиологических аварийных ситуациях. В кн. Гражданская оборона на страже мира и безопасности / Материалы V Международной научно-практической конференции, посвящённой Всемирному дню гражданской обороны. – М., 2021. – С. 481–490.

7. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2020 году: ежегодник. – Обнинск, 2021. – Ezhegodnik_ro 2020.pdf

8. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – 184 с.

9. Таловская А.В., Язиков Е.Г. Геохимический состав пылеаэрозолей на территории полигона "Томский" Томской области // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – Спецвыпуск 3. Избранные доклады Международной конференции и школы молодых учёных по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде, 14–25 июля 2007 г., Томск. – С. 30–36.

УДК 577.35.085

© 2023

РЕАГИРОВАНИЕ НА РАДИАЦИОННЫЕ ИНЦИДЕНТЫ В ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО РЕГИОНАЛЬНОГО АВАРИЙНОГО МЕДИКО- ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ФМБА РОССИИ

*Е.Е. Аладова, А.В. Ефимов, А.И. Алдошин, Л.Л. Хорешко
Россия, г. Озёрск ФГБУН Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России*

Необходимость усиления региональной системы противоаварийной готовности и реагирования на радиационные чрезвычайные ситуации ФМБА России продиктована ростом международной напряжённости и возрастающими угрозами радиологического и ядерного терроризма в сложившихся политических условиях. Анализ радиационных случаев в зоне ответственности ЮУРАМДЦ показал, что в структуре инцидентов преобладают случаи раневого поступления радионуклидов как на ПО "Маяк", так и на других радиационно опасных предприятиях. Нередки случаи ингаляционного поступления, превышения допустимых пределов доз внешнего облучения, а также факты обнаружения бесконтрольных источников ионизирующего излучения и др. Опыт реагирования на инциденты показал, что специалисты центра успешно выполняют задачи по оценке радиационной обстановки и медико-санитарных последствий, дозиметрическому сопровождению лиц, вовлечённых в радиологическую ситуацию, осуществляют при необходимости экспертно-аналитическую поддержку территориальных органов ФМБА России.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, РАДИАЦИОННО ОПАСНЫЙ ОБЪЕКТ, РАДИАЦИОННЫЙ ИНЦИДЕНТ, СИСТЕМА РЕГИОНАЛЬНОГО АВАРИЙНОГО РЕАГИРОВАНИЯ

В современной нестабильной политической обстановке в мире, сопровождающейся обострением международных противоречий, вопросы радиационной безопасности и защиты оказались как никогда актуальными. При этом сохраняется определённая вероятность возникновения нештатных ситуаций и радиационных аварий на радиационно опасных объектах (РОО) как в результате опасных природных явлений – землетрясений, наводнений, ураганов, так и вследствие ошибок, обусловленных человеческим фактором, которые могут сопровождаться радиоактивным загрязнением.

С целью развития системы регионального аварийного реагирования и обеспечения эффективной деятельности территориальных учреждений ФМБА России по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций (ЧС) радиационного характера, в соответствии с решением Коллегии ФМБА России о создании региональных аварийных медико-дозиметрических центров, в 2010 г. на базе ФГБУН "Южно-

Уральский институт биофизики" (ЮУриБФ) был создан Южно-Уральский региональный аварийный медико-дозиметрический центр (ЮУРАМДЦ).

Зона ответственности ЮУРАМДЦ включает в себя территории Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, общая численность населения которых составляет порядка 35 млн человек и отличается многообразием находящихся в её пределах РОО. Согласно радиационно-гигиеническому паспорту России на этой территории находятся около 6000 организаций, применяющих в своей деятельности техногенные источники ионизирующего излучения (ИИИ). Это различные медицинские, научные учреждения, промышленные, геолого-разведывательные, военные предприятия, пункты захоронения радиоактивных отходов. Среди них наиболее значимые – 19 крупных объектов Госкорпорации "Росатом", в том числе ФГУП "ПО "Маяк".

Приборно-инструментальное оснаще-

ние ЮУРАМДЦ позволяет оказывать дистанционную консультативную медико-дозиметрическую помощь, а также принимать непосредственное участие персонала специализированной радиологической бригады (СРБ) в составе сил ФМБА России при ликвидации последствий возможных радиационных аварий. При этом задачами, стоящими перед СРБ ЮУРАМДЦ, являются как оценка радиационной обстановки, доз облучения персонала и населения, так и выполнение задач по аварийному медицинскому реагированию [1].

В ЮУРАМДЦ созданы неснижаемые запасы медикаментов — средств профилактики радиационных поражений и лечения острых лучевых поражений, в т. ч. на случай масштабной радиационной аварии, а также аварийный резерв средств индивидуальной защиты (СИЗ) и спецодежды для участия в медико-дозиметрическом аварийном реагировании на радиационные аварии.

ЮУРАМДЦ тесно взаимодействует со службой радиационной безопасности (РБ) предприятий Росатома в случаях острого поступления соединений плутония, америция и урана в организм работников предприятия в производственных условиях. Сложившаяся в ЮУриБФ в течение последних десятилетий система дозиметрического контроля внутреннего облучения при поступлении радионуклидов через повреждённые кожные покровы постоянно совершенствуется, улучшается аппаратное

обеспечение за счёт современных высокочувствительных средств дозиметрического контроля, что позволяет повышать выявляемость ранних инцидентов.

С момента создания центра специалистами ЮУРАМДЦ разработан и внедрён в практику ряд важных нормативно-методических документов по вопросам медико-дозиметрического сопровождения случаев повышенного поступления изотопов плутония и ^{241}Am в организм работников предприятий ядерно-оружейного комплекса ГК "Росатом" [2–5].

Опыт реагирования на реальные аварийные инциденты, а также участие в противоаварийных учениях и тренировках способствует обеспечению готовности персонала ЮУРАМДЦ при необходимости в любое время успешно выполнять возложенные на них задачи в зоне чрезвычайных ситуаций.

РАДИАЦИОННЫЕ ИНЦИДЕНТЫ

Анализ накопленных в ЮУРАМДЦ данных показывает, что за период деятельности аварийного центра с августа 2010 г. по декабрь 2022 г. общее количество зарегистрированных аварийных случаев составило 95, из них 59 случаев относятся к ПО "Маяк", и о 36 нештатных ситуациях получены донесения Территориальных органов (ТО) ФМБА России, относящихся к РОО, расположенным в зоне ответственности ЮУРАМДЦ (рис. 1–3).

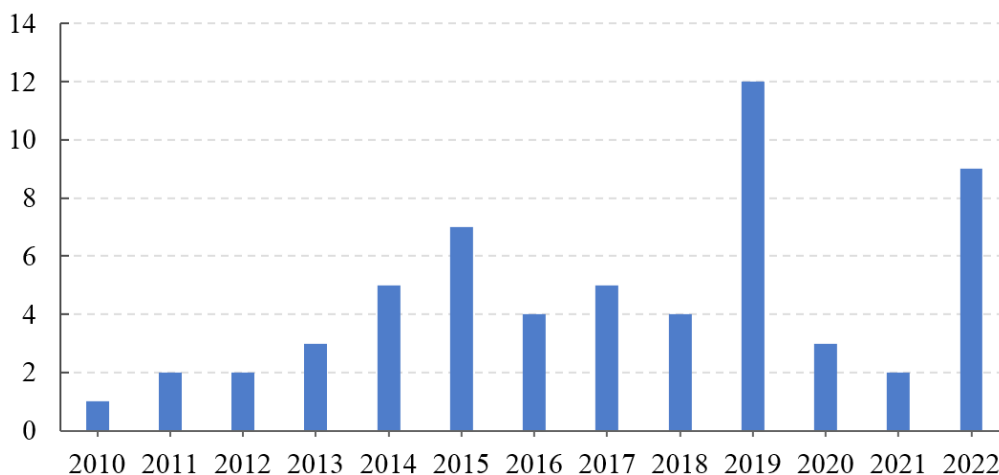


Рис. 1. Количество случаев аварийных инцидентов на ПО "Маяк", зарегистрированных в ЮУРАМДЦ



Рис. 2. Структура случаев аварийных инцидентов на ПО "Маяк" в 2010–2022 гг., зарегистрированных в ЮУРАМДЦ

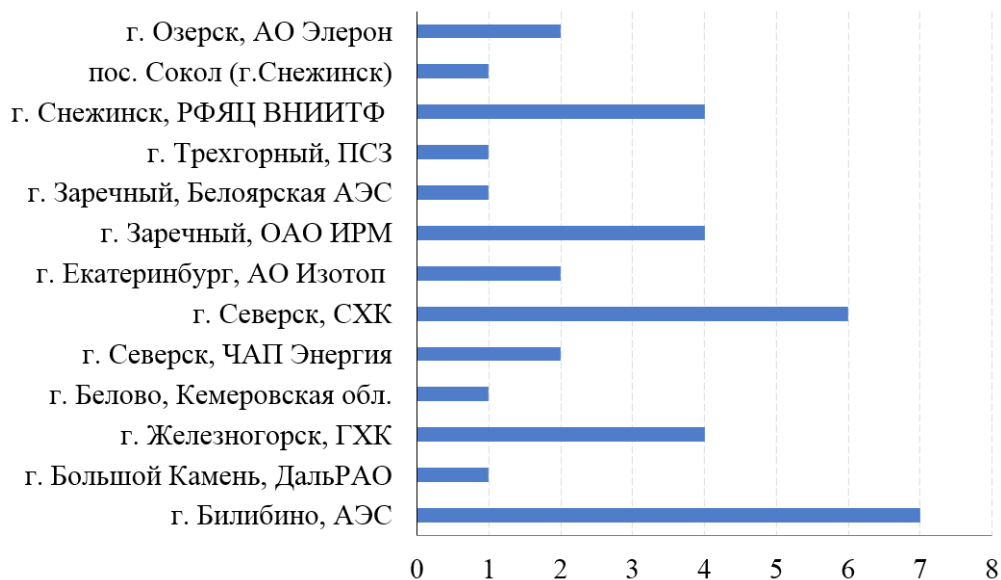


Рис. 3. Количество зарегистрированных в ЮУРАМДЦ нештатных ситуаций на РОО, расположенных в зоне ответственности центра (кроме ПО "Маяк")

В структуре зарегистрированных на ПО "Маяк" инцидентов основным путём поступления в организм был раневой (около 65 %), достаточно часто имел место ингаляционный путь (около 30 %), в последние годы также присутствовал фактор внешнего облучения персонала, эпизодически имели место случаи поверхностного кожного загрязнения радионуклидами (рис. 2).

Каждый случай острого поступления радионуклидов в организм является чрезвычайной ситуацией, поскольку может привести к значительным дозам внутреннего облучения, особенно при поступлении плутония и америция. Опасные количества радионуклидов могут поступить через колотые или резаные раны, а также через небольшие царапины и ссадины, всасывание через которые в сотни раз превышает резорбцию через неповреждённую кожу.

Анализ ингаляционных и раневых инцидентов на различных предприятиях ядерно-

оружейного комплекса, в том числе ПО "Маяк", и описание случаев, наиболее изученных и проанализированных с точки зрения дозиметрического сопровождения и успешности лечения при поступлении изотопов ^{239}Pu , ^{238}Pu и ^{241}Am , представлены в ряде публикаций [6–9].

В данном обзоре будут рассмотрены аварийные случаи, произошедшие на РОО в зоне ответственности ЮУРАМДЦ, расположенных на территориях Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, о которых были получены донесения в установленном порядке (рис. 3).

В структуре этих инцидентов можно выделить несколько видов событий: раневое поступление радионуклидов, причём оно преобладает, как и в структуре инцидентов на ПО "Маяк"; превышение допустимых пределов доз внешнего облучения; обнаружение бесконтрольного ИИИ; срабатывание систем безопасности на АЭС; пероральное поступление радионуклидов и др. (рис. 4).



Рис. 4. Структура зарегистрированных в ЮУРАМДЦ аварийных инцидентов на РОО в зоне ответственности центра (кроме ПО "Маяк")

Остановимся подробнее на некоторых из этих инцидентов.

Чукотский автономный округ. В октябре 2010 г. было получено внеочередное донесение от Межрегионального управления (МРУ-99) ФМБА России, г. Билибино, о том, что на Билибинской АЭС произошла остановка реакторной установки блока системной безопасности по превышению плотности нейтронного потока на 20 % от заданного. Предполагаемые причины нарушения: ошибка персонала при подъёме мощности реактора, ложное срабатывание датчика приборов защиты. Согласно окончательной оценке экспертов, нарушение в работе одного из энергоблоков не имело последствий для персонала, населения и территорий.

Аналогичный инцидент, связанный с нарушением в работе второго энергоблока, произошёл в ноябре 2016 г. Данный инцидент к каким-либо радиологическим последствиям для персонала, населения и прилегающих к Билибинской АЭС территорий не привёл.

Следует отметить, что все семь инцидентов, произошедших на Билибинской АЭС, имели отклонения, несущественные с точки зрения радиационной безопасности, которые классифицируются как уровень "0" по Международной шкале ядерных и радиологических событий INES [10].

Дальневосточный федеральный округ (ДФО). В ноябре 2010 г. было получено внеочередное донесение от медико-санитарной части ФГУЗ МСЧ № 98 ФМБА России по факту ЧС на ФГУП "ДальРао", Приморский край, г. Большой Камень, о том, что зарегистрировано пероральное поступление в организм сотрудницы ФГУП "ДальРао" ^{137}Cs активностью 3,9 МБк и ^{90}Sr активностью 7,6 кБк.

В результате обмена информацией об обстоятельствах происшествия, результатах первичного и повторного дозиметрического контроля, данных протоколов радиометрических измерений экспертами ЮУРАМДЦ выполнена корректировка предварительной оценки дозы облучения пострадавшей, даны рекомендации по оказанию необходимой медицинской помощи. Центр профпатологии ФГУЗ КБ-71 ФМБА России (г. Озёрск) был готов принять пациентку для проведения лечебных

мероприятий по выведению радионуклидов из организма, уточнения величины поступления и расчёта ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения (ОЭД). По согласованному решению специалистов МСЧ-98, Аварийного медицинского радиационного центра ФМБА России (АМРДЦ) и ЮУРАМДЦ пострадавшую транспортировали в ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. Окончательные экспертные оценки подтвердили отсутствие прогнозов возможности развития детерминированных эффектов облучения, внутреннее облучение за счёт инкорпорированных радионуклидов в единицах ОЭД составило $3,2 \pm 10$ мЗв по ^{137}Cs и $1,4 \pm 2,3$ мЗв по ^{90}Sr . Уровень "0" по шкале INES.

Несмотря на значительную удалённость от объектов, где произошли радиационные инциденты, специалистами ЮУРАМДЦ была оказана своевременная экспертно-аналитическая поддержка, что позволило провести необходимые санитарно-гигиенические, профилактические мероприятия по ликвидации и минимизации возможных последствий.

Уральский федеральный округ (УФО). ОАО "Институт реакторных материалов" (ИРМ), г. Заречный Свердловской области. 20 мая 2011 г. получено донесение, что при производстве радиоактивных изотопов произошло радиоактивное загрязнение поверхностей помещения постоянного пребывания персонала (т.н. зоны доступа) порошком карбоната бария, содержащего радиоизотоп ^{14}C . Загрязнение рабочего места слесаря-ремонтника (стол, инструменты) составило от 100 до 7000 β -част/см²·мин, рабочего халата – до 100 β -част/см²·мин, загрязнение пола составило 30–80 β -част/см²·мин. Вредный поражающий фактор – ингаляционное поступление радионуклидов, вызвавшее незапланированное внутреннее облучение работника. Оценка ожидаемой эффективной дозы за счёт ингаляционного поступления ^{14}C в организм работника не превысила 0,2 мЗв. Оказана консультативная помощь. Данный инцидент каких-либо негативных последствий для персонала, населения и прилегающих территорий не имел. Уровень "0" по шкале INES.

В январе 2012 г. в ОАО "ИРМ" при проведении работ в отделении радиационных технологий по производству радиоизотопной

продукции медицинского и немедицинского назначения произошло незапланированное повышенное внешнее облучение работника радиохимической лаборатории в дозе 41,4 мЗв. Была оказана консультативная помощь. Предполагалось направление данного работника в центр профессиональной радиационной патологии (ЦПРП) ФГБУЗ КБ № 71 ФМБА России (г. Озёрск), однако по результатам медицинского обследования в ФГБУЗ МСЧ № 32 ФМБА России оснований для этого найдено не было, патологических изменений в состоянии здоровья не выявлено. Уровень "0" по шкале INES.

Сибирский федеральный округ (СФО). В августе 2017 г., по запросу Межмуниципального отдела МВД России "Беловский" Кемеровской области, специализированная радиологическая бригада ЮУРАМДЦ была направлена в г. Белово для выполнения санитарно-эпидемиологического обследования объекта, обнаруженного в гаражном боксе, с целью оценки радиационной обстановки. По результатам обследования было выявлено, что в гараже хранились контейнеры с источниками ионизирующего излучения на основе радионуклида ^{137}Cs (рис. 5, 6).

На момент обследования документы на источники, а также данные о владельце источников отсутствовали. Источники охарактеризовали как бесхозные ("потерянные"). Хранение источников осуществлялось с нарушением требований пп. 3.5 и 3.13 СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010) [11]. Максимальное значение МАЭД в районе коллимационного отверстия источника составляло 1,8 мЗв/ч. По результатам проведённой экспертизы оформлены акт обследования и экспертное заключение с рекомендациями. Ущерб окружающей среде и населению не установлено, уровень "0" по шкале INES.

Данный инцидент относится к аварийной ситуации – потеря управления источником ионизирующего излучения (НРБ-99/2009, приложение 7, п. 1) [12]. Следует подчеркнуть, что в таких ситуациях пострадавшими оказываются, как правило, лица из населения и нередко – дети, у которых могут наблюдаться разные варианты лучевых поражений. К тому же не исключается возможность криминального использования бесхозных источников, поэтому в

таких случаях требуется немедленное принятие мер по захоронению ИИИ с привлечением специализированных организаций по обращению с радиоактивными отходами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Широкое применение ИИИ практически во всех сферах деятельности человека увеличивает вероятность возникновения различных радиационных аварий.

ЮУРАМДЦ за годы своего функционирования успешно интегрировался в систему регионального аварийного реагирования ФМБА России. Анализ радиационных инцидентов в зоне ответственности ЮУРАМДЦ показал, что специалисты центра успешно выполняют задачи по оценке радиационной обстановки и медико-санитарных последствий в районе аварии, осуществляют при необходимости экспертно-аналитическую поддержку территориальных органов ФМБА России, принимают участие в проведении лечебно-профилактических мероприятий, инструментальных и лабораторных исследований.

Для обеспечения готовности к чрезвычайным ситуациям ЮУРАМДЦ постоянно поддерживает наличие соответствующих ресурсов, которые могут быть незамедлительно задействованы в ответ на возникшую радиационную аварийную ситуацию.

Накопленный опыт и уроки, извлечённые при реагировании на инциденты, помогают выявлять пробелы в знаниях, координировать действия по обеспечению готовности к радиационным чрезвычайным ситуациям и реагированию на них, при этом повышать устойчивость функционирования центра.

Своевременное и эффективное реагирование на ЧС радиационного характера, чёткое выполнение оценки радиационной обстановки, а также проведение необходимых медико-санитарных мероприятий по предупреждению, локализации и ликвидации последствий чрезвычайной ситуации являются важными аспектами общего управления инцидентом, влияющими как на краткосрочные результаты, так и на долгосрочные последствия радиационного воздействия.



Рис. 5. Контейнер с источником ионизирующего излучения, хранившийся в гаражном боксе



Рис. 6. Измерение радиационных характеристик контейнера

ЛИТЕРАТУРА

1. Алдошин А.И., Аладова Е.Е., Василенко Е.К. и др. Современное состояние дел в области исследований и мероприятий для развития и организации реагирования на радиационные аварии и инциденты в системе ФМБА России // Вопросы радиац. безопасности. – 2018. – № 3 (91). – С. 39–49.
2. МУ 2.6.1.034-2014. Порядок взаимодействия предприятий Госкорпорации "Росатом" и учреждений ФМБА России при нестандартном (раневом) и аварийном ингаляционном поступлении изотопов плутония и америция-241.
3. МУ 2.6.5.051-2016. Допустимые уровни монофакторного воздействия при поступлении изотопов плутония и америция через повреждённые кожные покровы.
4. МУ 2.6.5.029-2016. Индивидуальный дозиметрический контроль при раневом поступлении плутония и америция. Общие требования.
5. МУ 2.6.5.078-2018. Порядок организации контроля внутреннего облучения от плутония на основе риск-ориентированного подхода к ограничению радиационного воздействия.
6. Хохряков В.Ф., Беляев А.П., Кудрявцева Т.И. и др. Случай успешного применения ДТПА при попадании плутония-239 через кожу, повреждённую азотной кислотой // Вопросы радиац. безопасности. – 1999. – № 1. – С. 49–53.
7. Жунтова Г.В., Азизова Т.В., Ефимов А.В. и др. Обзор случаев поступления α -излучающих нуклидов в организм работников ПО "Маяк" в результате нештатных ситуаций // Вопросы радиац. безопасности. – 2016. – № 2 (82). – С. 36–44.
8. Измestьев К.М., Овчинников А.В. Анализ поступления радионуклидов Am и Pu через повреждённые кожные покровы работников АО "СХК" с точки зрения биокинетической модели, приведённой в публикации № 156 НКРЗ // Вопросы радиац. безопасности. – 2018. – № 1 (89). – С. 48–55.
9. Соколова А.Б., Ефимов А.В. Современное состояние системы дозиметрического сопровождения случаев острого поступления актинидов у работников ПО "Маяк" // Вопросы радиац. безопасности. – 2018. – № 3 (91). – С. 56–64.
10. INES. Руководство для пользователей Международной шкалы ядерных и радиологических событий. – Издание 2008 г. – Вена: МАГАТЭ.
11. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010): Санитарные правила и нормативы СП-2.6.1.2612-10. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010.
12. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523–09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)". – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009.

УДК 571.27

© 2023

ФАКТОРЫ РОСТА У ЛИЦ, ПОДВЕРГШИХСЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ ХРОНИЧЕСКОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

*В.Л. Рыбкина, Д.С. Ослина, Т.В. Азизова, Г.В. Адамова**Россия, г. Озёрск, ФГБУН Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России**Е.Д. Другова**Россия, г. Москва, ФGAOY BO "Российский национальный**исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова"**Министерства здравоохранения РФ*

Целью данного исследования является оценка уровня экспрессии факторов роста в сыворотке крови у лиц, подвергшихся пролонгированному профессиональному облучению. Исследованы образцы крови у работников предприятия атомной промышленности ПО "Маяк", подвергшихся профессиональному хроническому облучению, в отдалённом периоде после окончания внешнего γ -облучения и в условиях продолжающегося внутреннего α -облучения (основная группа) и у жителей г. Озёрска, расположенного вблизи предприятия, не подвергавшихся облучению в результате профессиональной деятельности (контроль). Содержание факторов роста определяли в периферической крови методом иммуноферментного анализа. Содержание в сыворотке крови PDGF и TGF $_{\beta}$ было снижено в группе облучённых лиц по сравнению с контролем. Была выявлена статистически значимая обратная линейная зависимость TGF $_{\beta}$ от суммарной поглощённой в костный мозг дозы внутреннего α - и внешнего γ -излучения и от возраста. Содержание VEGF в сыворотке крови было повышено по сравнению с контролем и положительно коррелировало с суммарной поглощённой в костный мозг дозой внешнего γ -излучения. Выявленные изменения экспрессии факторов роста могут играть важную роль в формировании отдалённых эффектов облучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ФАКТОРЫ РОСТА, α -ОБЛУЧЕНИЕ, γ -ОБЛУЧЕНИЕ

Факторы роста (ФР) представляют собой секретируемые биологически активные молекулы, которые могут стимулировать или ингибировать митоз, либо влиять на клеточную дифференцировку. ФР могут воздействовать на специфические рецепторы клеточной поверхности, которые впоследствии передают сигналы роста другим внутриклеточным компонентам и в конечном итоге приводят к изменению экспрессии генов [1].

Известны факты, полученные в эксперименте на клеточных линиях и животных, а также при исследовании лиц, подвергшихся облучению, об изменении экспрессии факторов роста под влиянием ионизирующих излучений [2–12]. Ранее в когорте работников ПО "Маяк", подвергшихся пролонгированному сочетанному внешнему γ - и внутреннему α -облучению, было показано снижение концентрации в сыворотке крови EGF и TGF, а также повышение

FGF, независимого от доз облучения, и HGF, зависящего от содержания плутония в организме [5]. В настоящем исследовании использованы уточнённые дозы обновлённой дозиметрической системы 2013 [13, 14] и другие критерии подбора групп (исключены лица с ЗНО и тяжёлыми формами ИБС).

Целью данного исследования является оценка уровня экспрессии факторов роста в сыворотке крови лиц, подвергшихся профессиональному хроническому облучению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Исследованы образцы крови работников предприятия атомной промышленности, подвергшихся профессиональному хроническому сочетанному внешнему γ - и внутреннему α -облучению, в отдалённом периоде (основная группа) и жителей г. Озёрска, расположенного

вблизи предприятия, не подвергавшихся облучению в результате профессиональной деятельности (контроль). Период найма: 1948–1983 гг. Критериями включения в исследование являлись: наличие в базе данных "Клиника" полной медицинской информации и информации о нерadiационных факторах риска за весь период наблюдения [15]; проживание в г. Озёрске на момент обследования (известный статус проживания и жизненный статус). Критериями включения в основную группу кроме этого являлись: установленный на основании профессионального маршрута факт профессионального хронического облучения; наличие данных об индивидуальных измеренных годовых дозах внешнего и/или внутреннего облучения [13, 14]. Дополнительным критерием включения в контрольную группу было отсутствие факта профессионального облучения.

Исключающими критериями для обеих групп были: участие в ликвидации последствий радиационных аварий; проживание на загрязнённых радионуклидами территориях; терапевтическое облучение до взятия образца крови; установленный диагноз злокачественного новообразования, ишемической болезни сердца, цереброваскулярных заболеваний и облитерирующего атеросклероза периферических сосудов с тяжёлыми осложнениями (острый инфаркт миокарда, мозговой инсульт, тяжёлая сердечная недостаточность и дисциркуляторная энцефалопатия III степени), аллергического и аутоиммунного заболевания, острого инфекционного заболевания или обострения хронического инфекционного заболевания на момент взятия образцов крови.

Характеристика изучаемых групп представлена в табл. 1. При исследовании отдельных ФР наблюдались статистически значимые различия в соотношении мужчин и женщин и среднего возраста обследованных (табл. 1).

Содержание ФР определяли в сыворотке периферической крови методом иммуноферментного анализа. Образцы сыворотки были получены из Российского радиобиологического репозитория тканей человека [16]. Для получения сыворотки кровь набирали в вакуумные пробирки объёмом 10 мл из медиальной или латеральной подкожной вены руки в положении сидя или лёжа. Затем кровь отстаивали в

течение 30–60 мин при комнатной температуре. После центрифугирования (1500g, 10 мин) отделившуюся сыворотку переносили в криопробирки и помещали на хранение в низкотемпературные морозильники (-80°C) до момента использования. Перед использованием сыворотку размораживали при комнатной температуре, тщательно промешивая на шейкере.

Исследование содержания ФР сыворотки крови проводилось согласно рекомендациям производителей тест-систем с помощью микропланшетного фотометра для иммуноферментного анализа StatFax 4200 (США).

Исследовались следующие ФР: фактор роста фибробластов (англ. Fibroblast Growth Factor, FGF; R&D Systems, США); эпидермальный фактор роста (англ. Epidermal Growth Factor, EGF; Invitrogen Corporation, США); фактор роста стволовых клеток (англ. Stem Cell Factor, SCF; R&D, США); колониестимулирующий фактор роста гранулоцитов (англ. Granulocyte Colony Stimulating Factor, G-CSF; Цитокин, Россия); фактор роста гепатоцитов (англ. Hepatocyte Growth Factor, HGF; Invitrogen Corporation, США); тромбоцитарный фактор роста (англ. Platelet-derived Growth Factor, PDGF; R&D Systems, США); трансформирующий фактор роста бета (англ. Transforming Growth Factor- β , TGF β ; Bender MedSystems, Австрия); трансформирующий фактор роста α (англ. Transforming Growth Factor- α , TGF α ; R&D, Великобритания); фактор роста эндотелия сосудов (англ. Vascular endothelial growth factor, VEGF; Cytimmune, США), фактор роста эндотелия сосудов А (англ. Vascular endothelial growth factor A, VEGFA; Bender MedSystems, Австрия).

Оценка доз внешнего γ -излучения и внутреннего α -излучения проводилась с использованием дозиметрических систем [13, 14].

Характер распределения исследованных параметров определяли по методу Колмогорова-Смирнова. Статистический анализ полученных данных по оценке верности нулевой гипотезы проводили по методу Манна-Уитни, так как распределения параметров отличались от нормального. Корреляционные зависимости оценивали с помощью регрессионного анализа [17]. Для статистической обработки полученных данных использовали пакет программ "STATISTICA 12" [18]. Нулевая гипотеза отвергалась при $p < 0,05$.

Таблица 1

Характеристика изучаемых групп

Фактор роста	Группы	N	% муж.	Дозы				Возраст, лет	
				α , Гр		γ , Гр		M; SD	Min-max
				M; SD	Min-Max	M; SD	Min-Max		
EGF	1	104	56,73	0,066; 0,14	0,000025–0,82	0,53; 0,62	0,01–3,05	68,34; 9,06*	52–88
	2	124	48,4	–	–	–	–	57,36; 12,07	24–80
FGF	1	49	61,2	0,078; 0,16	0,000025–0,82	0,70; 0,61	0,00–2,35	69,26; 9,1*	48–88
	2	47	44,7	–	–	–	–	64,1; 10,9	43–81
SCF	1	54	61,1	0,009; 0,02	0,000025–0,82	0,25; 0,36	0,02–1,61	62,74; 8,95*	48–81
	2	64	67,5	–	–	–	–	56,22; 14,72	27–81
G-CSF	1	16	37,5*	0,08; 0,17	0,001–0,64	0,58; 0,54	0,05–1,81	74,93; 5,85	66–89
	2	10	70	–	–	–	–	74,1; 5,79	67–79
HGF	1	73	58,7	0,07; 0,14	0–0,82	0,60; 0,61	0–2,51	59,87; 10,56*	40–81
	2	101	66,3	–	–	–	–	70,0; 8,66	48–88
PDGF	1	43	74,4*	0,02; 0,03	0,0002–0,12	0,41; 0,40	0,06–1,83	64,1; 8,0*	48–80
	2	33	37,5	–	–	–	–	67,39; 9,99	43–81
TGF $_{\beta}$	1	215	45,4	0,11; 0,33	0,0000002–2,63	0,57; 0,72	0,0005–3,05	57,92; 9,54	28–83
	2	218	44,5	–	–	–	–	58,57; 13,09	24–81
TGF $_{\alpha}$	1	7	16,7*	0,10; 0,24	0,0004–0,64	0,43; 0,42	0,02–1,25	73,71; 1,11	72–75
	2	4	75	–	–	–	–	73,75; 4,79	67–78
VEGF	1	105	42,6	0,24; 0,42	0–2,63	1,09; 0,80	0,007–2,92	74,83; 6,13	61–89
	2	48	37,5	–	–	–	–	73,12; 5,41	57–83
VEGFA	1	22	68,18	0,016; 0,03	0,0005–0,14	0,41; 0,45	0,0005–1,64	63,14; 6,48	54–75
	2	17	70,58	–	–	–	–	62,29; 8,84	46–76

Примечание: 1 – основная группа; 2 – контроль; N – количество лиц в группе; % муж – процент мужчин в группе; α – суммарная поглощённая в КМ доза внутреннего α -излучения; γ – суммарная поглощённая в КМ доза внешнего γ -излучения; M – средняя; SD – стандартное отклонение; Min-max – минимум/максимум; * $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования показано, что концентрация PDGF и TGF $_{\beta}$ в сыворотке крови лиц основной группы была снижена ($p = 0,0017^*$ и $p = 0,0006^*$, соответственно), а VEGF – повышена по сравнению с контролем ($p = 0,04^*$). Содержание остальных факторов роста в основной группе не отличалось от контроля (табл. 2).

Была выявлена статистически значимая обратная линейная зависимость содержания TGF $_{\beta}$ в сыворотке крови лиц основной группы от возраста, от суммарной поглощенной в костном мозге (КМ) дозы внутреннего α -излучения

(далее – α -доза) (рис. 1) и от суммарной поглощенной в КМ дозы внешнего γ -облучения (далее – γ -доза) лиц основной группы (рис. 2), а также возраста лиц контрольной группы (рис. 3). Содержание VEGF в сыворотке крови лиц основной группы положительно коррелировало с γ -дозой (рис. 4).

Зависимости других факторов от доз внутреннего и внешнего облучения и возраста не выявлено.

Фактор роста PDGF синтезируется мегакариоцитами и запасается в α -гранулах тромбоцитов. PDGF является мощным митогеном для клеток мезенхимального происхождения и стимулирует пролиферацию фибробластов и

Таблица 2

ФР у лиц основной и контрольной групп

Фактор роста	Группы	Величина показателя					P
		M	SD	Me	Q1–Q3	Min-Max	
EGF, $\times 10^{-9}$ г/л	1	68,94	61,89	55,33	13,0–107,6	3,25–224,0	0,25
	2	88,33	76,04	79,60	11,09–156,21	0,008–266,9	
FGF, $\times 10^{-9}$ г/л	1	46,84	29,50	59,21	11,91–70,70	0,84–86,36	0,33
	2	56,23	24,19	58,17	48,60–71,40	3,62–106,19	
SCF, $\times 10^{-9}$ г/л	1	1245,38	293,14	11216,75	1075,4–1389,2	438,2–2007,3	0,2
	2	11306,9	289,59	1292,74	1128,07–1477,14	730,13–2518,89	
G-CSF, $\times 10^{-9}$ г/л	1	0,90	1,86	0	0–0,35	0–6,21	0,46
	2	1,27	2,06	0,50	0–1,54	0–6,59	
HGF, $\times 10^{-9}$ г/л	1	1019,65	489,23	917,50	664,7–1315,3	291,8–3417	0,87
	2	1015,30	502,15	882,70	657,5–1234	377,8–3222,97	
PDGF, $\times 10^{-9}$ г/л	1	4276,16	1765,25	4530,34	3373,39–5523,31	0–6716,69	0,0017*
	2	5613,08	1458,49	5696,39	4854–6503	2180–9505	
TGF $_{\beta}$, $\times 10^{-9}$ г/л	1	20304,94*	20316,66	15602,60	3374,0–33328,4	0–90300	0,0006*
	2	28816,84	25392,51	23581,00	5029,3–45420	0–117161,9	
TGF $_{\alpha}$, $\times 10^{-9}$ г/л	1	3,86	2,19	3,00	3–5	1–8	0,22
	2	11,50	8,81	12,50	4–19	2–19	
VEGF, $\times 10^{-9}$ г/л	1	569,45	456,60	198,80	76,6–406	0–1433,8	0,04*
	2	300,76	332,30	189,00	45,52–476,1	1,82–1716,4	
VEGFA, $\times 10^{-9}$ г/л	1	394,88	228,05	412,70	168,7–597,8	95,98–786,2	0,44
	2	514,13	437,42	530,60	376,4–22	23,32–1985,2	

Примечание: 1 – основная группа; 2 – контроль; M – среднее; SD – стандартное отклонение; Me – медиана; Q1–Q3 – 25 и 75 процентиль; Min-Max – минимум/максимум; * статистически значимые различия по сравнению с контролем ($p < 0,05$).

клеток гладкой мышечной ткани посредством рецепторов, расположенных на этих клетках. Кроме того, PDGF увеличивает продукцию гликозаминогликанов и коллагена и играет важную роль в эмбриональном развитии, пролиферации, миграции клеток и в ангиогенезе. Было показано, что в моноцитах-макрофагах и фибробластах PDGF стимулирует хемотаксис, пролиферацию и экспрессию многих генов. Он значительно увеличивает приток иммунных клеток и фибробластов в повреждённые ткани, стимулирует выработку коллагена и тем самым сокращает время заживления [19].

Содержание в сыворотке крови PDGF статистически значимо снижено в группе облучённых лиц по сравнению с контролем; зависимости от α - и γ -дозы и от возраста не

выявлено (табл. 3). Сниженное содержание в сыворотке крови PDGF может препятствовать заживлению ран и способствовать развитию опухолей и атеросклероза. В группе облучённых лиц было больше мужчин, а средний возраст обследованных был ниже, чем в контроле. Данные литературы свидетельствуют о том, что содержание PDGF у мужчин ниже, чем у женщин, и снижается с возрастом [20]. Таким образом, выявленные нами различия могут быть связаны как с фактором облучения, так и с большим количеством мужчин в основной группе по сравнению с контролем. Для уточнения данного вопроса необходимы дальнейшие исследования.

TGF $_{\beta}$ – цитокин, который контролирует пролиферацию, клеточную дифференцировку,

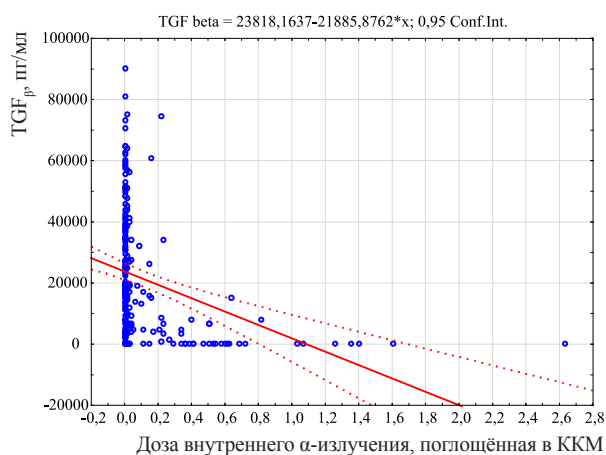


Рис. 1. Зависимость содержания TGF_{β} в сыворотке крови облучённых лиц от суммарной поглощённой в КМ дозы внутреннего α -излучения

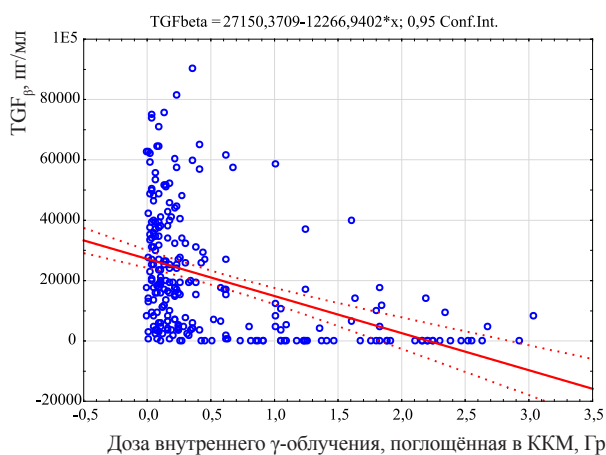


Рис. 2. Зависимость содержания TGF_{β} в сыворотке крови облучённых лиц от суммарной поглощённой в КМ дозы внешнего γ -облучения

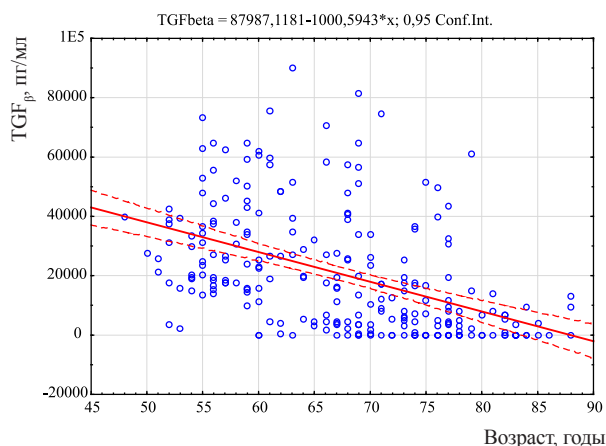


Рис. 3. Зависимость содержания TGF_{β} от возраста лиц контрольной группы

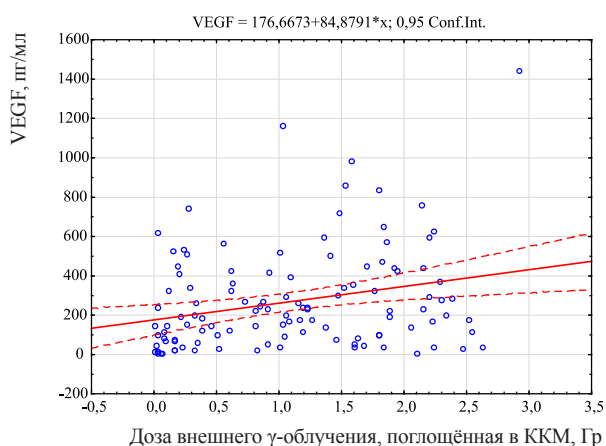


Рис. 4. Зависимость концентрации VEGF в сыворотке лиц основной группы от суммарной поглощённой в КМ дозы внешнего γ -облучения

подвижность и адгезию различных клеток, участвует в процессах репродукции, эмбрионального развития, регуляции роста нервов, формирования костной ткани, гемопоэза, заживления ран и иммунологической толерантности. TGF_{β} выделяется клетками во внеклеточную среду и действует как антипролиферативный фактор в нормальных эпителиальных клетках и на ранних стадиях онкогенеза. В нормальных клетках TGF_{β} , действуя через свой сигнальный путь, блокирует клеточный цикл на G1-стадии,

останавливая пролиферацию, индуцирует апоптоз или дифференцировку, а также инициирует апоптоз в большинстве типов клеток. Некоторые клетки, секретирующие TGF_{β} , также имеют рецепторы для него. TGF_{β} синтезируются многими типами клеток, включая макрофаги. Макрофаги, активированные воспалительными стимулами, секретируют активный TGF_{β} , вызывая активацию плазмينا. Также TGF_{β} как

Таблица 3

Зависимость содержания ФР в сыворотке крови у лиц основной группы от суммарной поглощённой в КМ дозы внешнего γ - и внутреннего α -излучения и возраста на момент обследования

Фактор роста	Группа	Коэффициенты корреляции		
		от дозы α -излучения	от дозы γ -излучения	от возраста
EGF	1	-0,05	0,12	
	2	—	—	-0,1
FGF	1	-0,075	-0,16	
	2	—	—	-0,21
SCF	1	0,14	0,15	
	2	—	—	0,24
G-CSF	1	-0,22	-0,16	
	2	—	—	-0,13
HGF	1	-0,18	-0,11	
	2	—	—	0,04
PDGF	1	-0,09	-0,21	-
	2			0,21
TGF	1	-0,33*	-0,42*	
	2	—	—	-0,40*
TGF $_{\alpha}$	1	-0,63	-0,14	
	2			0,56
VEGF	1	-0,02	0,27*	
	2	—	—	-0,026
VEGFA	1	-0,39	-0,26	
	2	—	—	0,20

Примечание: 1 – основная группа, 2 – контроль, * $p < 0,05$.

полагают, играет важную роль в регуляции работы иммунной системы. Через белок Foxp3 он влияет на регуляторные Т-клетки и Т-хелперы 17 и может блокировать активацию лимфоцитов и макрофагов.

В настоящем исследовании содержание TGF $_{\beta}$ в сыворотке крови было статистически значимо снижено в группе облучённых лиц по сравнению с контрольной группой. Была выявлена статистически значимая обратная линейная зависимость этого показателя от α -дозы, от γ -дозы и от возраста (табл. 4). Снижение TGF $_{\beta}$ с

возрастом выявлено также в исследовании [21].

Полученные нами результаты согласуются с данными по исследованию TGF $_{\beta}$ у работников, подвергшихся воздействию профессионального облучения [5]. Поскольку основная и контрольная группы были сопоставимы по полу и возрасту, выявленные изменения, скорее всего, обусловлены облучением.

Раковые клетки увеличивают количество секретируемого TGF $_{\beta}$. Это приводит к супрессии иммунного ответа и стимуляции ангиогенеза, что делает рак более "агрессивным". TGF $_{\beta}$ также преобразует эффекторные Т-клетки, которые в обычной ситуации атакуют раковые клетки в ходе воспалительной (иммунной) реакции, в регуляторные (супрессорные) Т-клетки, которые выключают воспалительную реакцию.

Достаточно высокая концентрация TGF $_{\beta}$ найдена в крови и спинномозговой жидкости пациентов с болезнью Альцгеймера по сравнению с контролем. Это говорит о возможной роли этого белка в дегенеративном каскаде, приводящем к симптомам патологии болезни Альцгеймера [22]. Сниженное количество TGF $_{\beta}$ может замедлять заживление ран и препятствовать росту опухолей и развитию нейродегенеративной патологии.

VEGF – семейство сигнальных белков, стимулирующий васкулогенез и ангиогенез. В настоящее время известно несколько различных факторов данного семейства. Основные функции VEGF – создание новых кровеносных сосудов в эмбриональном развитии или после травмы, усиление роста мышц после физических упражнений, обеспечение коллатерального кровообращения. Белки VEGF служат частью системы, отвечающей за восстановление подачи кислорода к тканям в ситуации, когда циркуляция крови недостаточна.

Содержание в сыворотке крови VEGF было статистически значимо повышено по сравнению с соответствующим показателем контрольной группы. Его содержание в сыворотке крови положительно коррелировало с γ -дозой (табл. 4), что согласуется с экспериментальными данными на культурах клеток [9] и в эксперименте на животных [23]. Можно предположить, что повышение этого показателя обусловлено влиянием внешнего γ -облучения.

Таблица 4

Основные эффекты сочетанного облучения на факторы роста

Показатель	Различия в уровне показателей основной и контрольной групп	Зависимость показателя от дозы внутреннего α -излучения на КМ	Зависимость показателя от дозы внешнего γ -излучения на КМ	Зависимость от возраста
EGF	нет	нет	нет	нет
FGF	нет	нет	нет	нет
SCF	нет	нет	нет	нет
HGF	нет	нет	нет	нет
PDGF	↓	нет	нет	нет
TGF β	↓	обратная	обратная	обратная
VEGF	↑	нет	прямая	нет

Примечание: ↓ – концентрация показателя понижена в основной группе по сравнению с контролем; ↑ – концентрация показателя повышена в основной группе по сравнению с контролем.

Повышенная активность VEGF может способствовать канцерогенезу. Уровень VEGF коррелирует с неблагоприятным прогнозом при раке молочной железы. Многочисленные исследования показывают снижение общей выживаемости и выздоровления с этими опухолями при избыточной экспрессии VEGF. Сверхэкспрессия VEGF может быть первым шагом в процессе метастазирования [24].

Избыточная экспрессия VEGF может вызвать сосудистые заболевания различных органов. Концентрация VEGF в сыворотке крови повышена при бронхиальной астме и сахарном диабете. Белки семейства VEGF также синтезируются при ревматоидном артрите в ответ на ФНО- α , вызывая повышение сосудистой проницаемости и отеки, а также стимулирование ангиогенеза [25]. VEGF играет важную роль при диабетической ретинопатии. Микроциркуляторные проблемы в сетчатке людей с диабетом могут привести к ишемии сетчатки, что приводит к высвобождению VEGF, который начинает преобладать над антиангиогенными изоформами VEGFb. Активность VEGF, в свою очередь, способна привести к образованию новых кровеносных сосудов в сетчатке, предвещая изменения, которые могут представлять угрозу для зрения [26]. В почках повышенная экспрессия VEGF в клубочках непосредственно вызывает гломерулярную гипертрофию, связанную с протеинурией [27].

Следовательно, повышенный уровень

VEGF может играть отрицательную роль в патогенезе многих заболеваний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования выявлены следующие эффекты:

- содержание PDGF и TGF β в сыворотке крови лиц, подвергшихся хроническому облучению, было статистически значимо ниже по сравнению с соответствующими показателями в контрольной группе;
- была выявлена статистически значимая обратная линейная зависимость содержания TGF β в сыворотке крови лиц, подвергшихся хроническому облучению, от суммарной поглощенной в КМ дозы внутреннего α -излучения, от суммарной поглощенной в КМ дозы внешнего γ -излучения и от возраста;
- содержание VEGF в сыворотке крови лиц, подвергшихся хроническому облучению, было статистически значимо ниже при сравнении с контролем и положительно коррелировало с суммарной поглощенной в КМ дозой внешнего γ -излучения.

Выявленные изменения экспрессии факторов роста могут играть важную роль в формировании отделенных эффектов облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stone W.L., Leavitt L., Varacallo M. Physiology,

- Growth Factor [Электронный ресурс] // Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2022 // Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK442024/> (дата обращения: 2023-5-25)
2. Рыбкина В.Л., Азизова Т.В., Майнеке В. Влияние хронического облучения на некоторые показатели иммунитета // Иммунология. – 2015. – Т. 36. – № 3. – С. 145–149.
3. Rybkina V.L., Bannikova M.V., Adamova G.V. Immunological markers of chronic occupational radiation exposure // Health Physics. – 2018. – V. 115. – No. 1. – P. 108–113.
4. Rybkina V.L., Azizova T.V., Scherthan H. et al. Expression of blood serum proteins and lymphocyte differentiation clusters after chronic occupational exposure to ionizing radiation // Radiation and Environmental Biophysics. – 2014. – V. 53. – No. 4. – P. 659–670.
5. Kirillova E.N., Zakharova M.L., Muksinova K.N. et al. Quantitative assessment of regulatory proteins in blood as markers of radiation effects in the late period after occupational exposure // Health Physics. – 2012. – V. 103. – No. 1. – P. 18–36.
6. Boerma M., Schutte-Bart., Wedekind L.E. Effects of multiple doses of ionizing radiation on cytokine expression in rat and human cells // International J. of Radiation Biology. – 2003. – V. 79. – No. 11. – P. 889–896. – doi: 10.1080/09553000310001626117
7. Schröder S., Juerß D., Kriesen S. et al. Immunomodulatory properties of low-dose ionizing radiation on human endothelial cells // International J. of Radiation Biology. – 2018. – doi: 10.1080/09553002.2018.1486515
8. Witte L., Fuks Z., Haimovitz-Friedman A. et al. Effects of irradiation on the release of growth factors from cultured bovine, porcine, and human endothelial cells // Cancer Research. – 1989. – V. 49. – P. 5066–5072. – PMID: 2548709.
9. Zhou G., Xu Y., He B. et al. Ionizing radiation modulates vascular endothelial growth factor expression through STAT3 signaling pathway in rat neonatal primary astrocyte cultures // Brain and Behavior. – 2020. – doi.org/10.1002/brb3.1529
10. Pan S., Wang J., Wu A. et al. Radiation exposure-induced changes in the immune cells and immune factors of mice with or without primary lung tumor. Dose-response // Dose Response. – 2020. – V. 18. – No. 2. – doi: 10.1177/1559325820926744
11. Fardid R., Ghahramani P., Mosleh-Shirazi M.A. et al. Expression of transforming growth factor-beta and interferon gamma biomarkers after whole body gamma irradiation // J. of Cancer Research and Therapeutics. – 2019. – V. 15. – P. 135–139. – doi: 10.4103/jcrt.JCRT.1324.16
12. Hussien S.M. Cellular and molecular detection of multi-doses of ionizing radiation-induced immunomodulatory response // Cell Biochemistry and Biophysics. – 2021. – doi.org/10.1007/s12013-021-01017-5
13. Birchall A., Vostrotin V., Puncher M. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013) for internally deposited plutonium: an overview // Radiat. Prot. Dosimetry. – 2017. – V. 176. – P. 10–31. – doi: 10.1093/rpd/ncx195
14. Vasilenko E.K., Scherpelz R.I., Gorelov M.V. et al. External dosimetry reconstruction for Mayak workers [Электронный ресурс] / AAHP Special Session Health Physics Society Annual Meeting. – 2010. Available at: http://www.hps1.org/aaHP/public/AAHP_Special_Sessions/2010_Salt_Lake_City/pm-1.pdf.
15. 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 Physics. – 2008. – V. 94. – No. 5. – P. 449–458. – doi 10.1097/01.HP.0000300757.00912.a2
16. Muksinova K.N., Kirillova E.N., Zakharova M.L. et al. A repository of bio-specimens from Mayak workers exposed to protracted radiation // Health Physics. – 2006. – V. 90. – No. 3. – P. 263–265.
17. Гланц С. Медико-биологическая статистика. – пер. с англ. – М.: Практика, 1999. – 459 с.
18. Программное обеспечение "STATISTICA" [Электронный ресурс], TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA.
19. Hannink M., Donoghue D.J. Structure and function of platelet-derived growth factor (PDGF) and related proteins // Biochim. Biophys. Acta. – 1989. – V. 1. – P. 1–10. – doi:10.1016/0304-419x(89)90031-0. PMID 2546599.
20. Evanson J.R., Guyton M.K., Oliver D.L. et al. Gender and age differences in growth factor concentrations from platelet-rich plasma in adults // Mil. Med. – 2014. – V. 179. – No. 7. – P. 799–805. – doi: 10.7205/MILMED-D-13-00336. PMID: 25003868
21. Van der Kraan P.M. Age-related alterations in TGF beta signaling as a causal factor of cartilage

- degeneration in osteoarthritis // *Biomed Mater Eng.* – 2014. – V. 24. – No. 1. – P. 75–80. – doi: 10.3233/BME-140976. PMID: 24928920
22. Кетлинский С.А., Симбирцев А.С. Цитокины. – СПб.: ООО "Издательство "Фолиант", 2008. – С. 369–378.
23. Kiang J.G., Smith J.T., Hegge S.R., Ossetrova N. I. Circulating cytokine/chemokine concentrations respond to ionizing radiation doses but not radiation dose rates: granulocyte-colony stimulating factor and interleukin-18 // *Radiat Research.* – 2018. – V. 189. – P. 634–643. – doi: 10.1667/RR14966.1
24. Carmeliet P. VEGF as a key mediator of angiogenesis in cancer // *Oncology.* – 2005. – V. 69. – No. 3. – P. 4–10. – doi: 10.1159/000088478. PMID: 16301830
25. Harada M., Mitsuyama K., Yoshida H. et al. Vascular endothelial growth factor in patients with rheumatoid arthritis // *Scand. J. Rheumatol.* – 1998. – V. 27. – No. 5. – P. 377–380. – doi: 10.1080/03009749850154429. – PMID: 9808403
26. Gupta N., Mansoor S., Sharma A. et al. Diabetic retinopathy and VEGF // *Open Ophthalmol J.* – 2013. – V. 7. – P. 4–10. – doi: 10.2174/1874364101307010004. PMID: 23459241; PMCID: PMC3580758
27. Schrijvers B.F., Flyvbjerg A., De Vriese A.S. The role of vascular endothelial growth factor (VEGF) in renal pathophysiology // *Kidney Int.* – 2004. – V. 65. – No. 6. – P. 2003–2017. – doi: 10.1111/j.1523-1755.2004.00621.x. PMID: 15149314

УДК 61+311+614.876

© 2023

**МЕДИКО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ РЕГИСТР ПЕРСОНАЛА
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ "МАЯК":
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

***М.Э. Сокольников, Н.Р. Кабирова, П.В. Окатенко, Н.А. Кошурникова,
Ю.В. Царева, И.А. Мартиненко, Е.В. Денисова
Россия, г. Озёрск, ФГБУН Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России***

Работа посвящена общим вопросам формирования, текущему состоянию медико-дозиметрического регистра работников ПО "Маяк", который создан и поддерживается в Южно-Уральском институте биофизики на протяжении многих лет.

Медико-дозиметрический регистр включает всех лиц, приступивших к работе в период 1948–2016 гг. на основных заводах ПО "Маяк": реакторных, радиохимическом, химико-металлургическом; и вспомогательных подразделениях: ремонтно-механическом заводе и заводе водоподготовки. Персонал ПО "Маяк" в процессе профессиональной деятельности мог подвергаться как хроническому внешнему γ -облучению, так и внутреннему облучению от инкорпорированных радионуклидов. По состоянию на 31.12.2018 включает данные на 36480 чел.: 27216 мужчин и 9264 женщины (25,4 % от общего числа лиц). Жизненный статус установлен для 95,2 %, период эпидемиологического наблюдения составляет более 70 лет. Из числа лиц с установленным жизненным статусом умерли 52,8 %, причина смерти установлена в 89 % случаев.

Уникальная информация, аккумулируемая в регистре, может быть использована для оценки значимости техногенного облучения в широком диапазоне доз как внешнего облучения, так и внутреннего и комбинированного облучения. Длительный период наблюдения, достоверная точная информация о жизненном статусе, причинах смерти и злокачественных новообразованиях позволяют получить достаточно точные количественные оценки риска отдалённых эффектов длительного радиационного воздействия за счёт профессиональной деятельности.

В статье обозначены перспективы использования регистра, как инструмента для оценок радиационного риска в выработке научно-обоснованных рекомендаций для совершенствования стандартов радиационной безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МЕДИКО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ РЕГИСТР, БАЗА ДАННЫХ, ПЕРСОНАЛ, ПО "МАЯК", ДОЗА ОБЛУЧЕНИЯ, РАДИАЦИОННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ЖИЗНЕННЫЙ СТАТУС, ПРИЧИНЫ СМЕРТИ, ЗЛОКАЧЕСТВЕННЫЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ, РАДИОГЕННЫЙ РИСК

ФГУП "Производственное объединение "Маяк" (ПО "Маяк") является одним из первых и крупнейших в мире комплексов предприятий атомной индустрии [1, 2]. При пуске, становлении и функционировании производств ядерно-топливного цикла на здоровье человека оказывалось влияние различных техногенных факторов, связанных с условиями труда. Для эпидемиологического наблюдения за смертностью и заболеваемостью, для изучения эффектов хронического радиационного воздействия создан медико-дозиметрический регистр работников ПО "Маяк" [3–9], зарегистрированный как база данных [10], который

является одним из важнейших источников информации о влиянии длительного радиационного облучения на здоровье людей обоих полов. Регистр создан и поддерживается в лаборатории радиационной эпидемиологии Южно-Уральского института биофизики, включает всех лиц, приступивших к работе в период 1948–2016 гг. на основных заводах ПО "Маяк": реакторных, радиохимическом, химико-металлургическом; и вспомогательных подразделениях: ремонтно-механическом заводе и заводе водоподготовки. Эта база данных является постоянно действующей информационной системой сбора, компьютеризации

и контроля качества персонифицированной информации персонала ПО "Маяк".

В базе данных работников ПО "Маяк" содержатся персональные данные. Их сбор, обработка, учёт и хранение осуществляются на основании законов Российской Федерации: № 152-ФЗ "О персональных данных" от 27 июля 2006 г.; № 390-ФЗ "О безопасности" от 28 декабря 2010 г.; № 323-ФЗ "Об основах охраны здоровья граждан в Российской Федерации" от 21 ноября 2011 г.; № 3-ФЗ "О радиационной безопасности населения" от 9 января 1996 г.; № 149-ФЗ "Об информации, информационных технологиях и о защите информации" от 27 июля 2006 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Критерии включения в регистр персонала ПО "Маяк"

В медико-дозиметрический регистр персонала ПО "Маяк" входит информация о работниках, нанятых в период 1948–2016 гг. на основные заводы и во вспомогательные подразделения. В структуре основного производства функционируют следующие заводы: реакторные и радиохимический – с 1948 г., химико-металлургический – с начала 1949 г., а в структуру вспомогательного производства с 1948 г. были взяты ремонтно-механический завод и завод водоподготовки. Включению в регистр подлежали все без исключения лица, официально зачисленные в штат этих заводов.

Персонал основных заводов ПО "Маяк", наблюдение за которым ведётся уже более 70 лет, в процессе профессиональной деятельности мог подвергаться как хроническому внешнему γ -излучению, так и внутреннему облучению от инкорпорированных радионуклидов. Информация о профессиональном маршруте, представленная в регистре, включает данные обо всех перемещениях того или иного работника по различным заводам ПО "Маяк".

Источники информации сбора первичных данных

Сбор первичных данных для создания регистра персонала ПО "Маяк" начат в 1985 г. В

группе кадрового делопроизводства ПО "Маяк" на всех работников предприятия, как на ранее уволившихся, так и ныне работающих, была извлечена следующая индивидуальная кадровая информация: фамилия, имя, отчество, дата рождения, дата поступления на ПО "Маяк", завод, профессия, маршрут передвижения с одного завода на другой, смена профессий. Для работников, уволившихся с ПО "Маяк", получены сведения о дате, причине увольнения и новом месте назначения, если таковые были. В дополнение к этому в отделах кадров основных и вспомогательных заводов ПО "Маяк" была получена более детальная информация о профессиональных маршрутах работников, включавшая сведения о перемещениях между различными подразделениями этих заводов и изменениях профессии. Кроме того, использовали информацию из анкет, заполняемых работниками ПО "Маяк" при приёме на работу и хранимых в их личных делах: точная дата рождения, место рождения, фамилии и адреса ближайших родственников, изменение семейного положения, изменение имён и фамилий, место работы до поступления на ПО "Маяк", сведения о выезде (место нового назначения или пункт выбытия, если таковой имелся).

Дата и причина смерти, информация о злокачественных новообразованиях (ЗНО), не являющихся непосредственной причиной смерти, результаты гистологического исследования, сведения о факторах риска (вредных привычках, заболеваниях, в том числе профессиональных, наличии профессиональной вредности до поступления на ПО "Маяк") получены из медицинских документов (амбулаторные карты, истории болезней, карты диспансерного наблюдения онкобольных (Форма № 030-6), протоколы патологоанатомического исследования, акты судебно-медицинской экспертизы (Ф. № 013-У), врачебные свидетельства о смерти (Ф. № 106/У) ФГБУЗ КБ № 71 ФМБА России. Данные собраны за период с 1948–2018 гг.

В отделе адресно-справочной работы УФМС г. Озёрска из адресной карточки прибытия/убытия (Ф. № 2) получены сведения об адресе, дате и причине выбытия, а также населённом пункте, куда субъект выехал. В работе по установлению адреса (жизненный статус) использовали сведения базы застрахованных

людей в страховых компаниях. В настоящее время основным источником информации о местонахождении гражданина Российской Федерации являются также подразделения по вопросам миграции Управления Министерства внутренних дел (УМВД) России. Далее для поиска местонахождения регистранта, потерянного для наблюдения, а также для подтверждения жизненного статуса лиц, для которых не получена информация из медицинских учреждений и УМВД, важным источником данных является контакт с самим регистрантом или его родственниками. Основными каналами связи можно рассматривать социальные сети, телефонную связь, электронную и обыкновенную почту.

Информация об уровнях радиационного воздействия

Персонал основных заводов подвергался действию ионизирующего излучения различных типов: внешнее γ -излучение на реакторном производстве, смешанное воздействие от внешнего γ - и внутреннего α -излучения на радиохимическом производстве и внутреннее α -излучение на заводе по производству плутония. Лица, занятые на вспомогательных производствах, не подвергались действию ионизирующего излучения, за исключением случаев, когда они работали в бригадах капитального ремонта (ремонтно-механический завод) или работали в контакте с ионизирующими излучениями в других подразделениях ПО "Маяк", не вошедших в регистр.

Данные о дозах внешнего γ -излучения (все текущие и архивные сведения об индивидуальных измеренных дозах на каждого человека) получены из службы радиационной безопасности ПО "Маяк" [11, 12]. В течение последних лет специалистами ПО "Маяк" проведена большая работа по верификации и корректировке индивидуальных доз внешнего γ -излучения с учётом профессионального маршрута, энергетической зависимости дозиметра и угловой зависимости по отношению к источнику излучения. В результате этой работы в настоящее время создана дозиметрическая система "Дозы-2013" (MWDS-2013) для лиц, нанятых в 1948–1982 гг. [13]. Наибольший вклад в дозовую информацию внесли лица с измеренными дозами (73 %).

При этом в системе "Дозы-2013" присутствуют люди с измеренными и одновременно с реконструированными дозами (11 %).

Данные о содержании и дозах внутреннего облучения инкорпорированным плутонием были получены из биофизической лаборатории ЮУрИБФ. Дозы оценивались на основе содержания ^{239}Pu в организме по уровню его естественной экскреции с мочой и биокинетических моделей поведения радионуклида в организме человека. Кроме того, учитывался профессиональный маршрут работника, физико-химические свойства промышленных α -излучающих аэрозолей, статус курения [14–15]. Регулярный мониторинг облучения плутонием на ПО "Маяк" начался лишь в 1970-х годах, в результате 22 % лиц в регистре прошли биофизическое обследование на содержание ^{239}Pu в организме.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Состав медико-дозиметрического регистра персонала ПО "Маяк"

Учитывая существенные различия условий труда в период освоения производства и в период регламентной работы предприятия, анализ информации (дозиметрические данные, сведения о причинах смерти, онкологической заболеваемости) проводился как за весь период существования предприятия, так и отдельно для периодов, сформированных по году начала работы на комбинате, различающихся по условиям труда. Период становления производства охватывает первые десять лет (1948–1958), а в период с 1959 по 1972 гг. осваиваются новые технологии, в период с 1973 г. по настоящее время на предприятии регистрировалось устойчивое функционирование основных подразделений с соблюдением производственных технологий и обеспечением высокой степени защищённости работников.

В табл. 1 представлена количественная характеристика регистра персонала в зависимости от периода начала работы. Регистр персонала ПО "Маяк" по состоянию на 31.12.2018 включает 36480 чел., из них 27216 мужчин и 9264 женщины. На долю женщин – работников предприятия – приходится 25,4 %. Как видно из данных табл. 1, количество лиц, принятых

на работу на основные заводы в 1948–1972 гг., составляет 58 % в отличие от приёма на работу в период с 1973 по 1999 гг. – 25,2 %, что понятно, так как стаж работы большинства из начавших трудовую деятельность в годы пуска и становления ПО "Маяк" составляет 40 лет и более. Лица, нанятые в период с 2001 по 2016 гг., составляют 16,8 % от общего числа лиц в регистре.

Определение жизненного статуса

Одним из важных этапов ведения регистра является определение жизненного статуса (ЖС) лиц, включённых в него. Точная информация о жизненном статусе каждого члена регистра имеет особое значение, поскольку данные о судьбе каждого индивидуума: о дате начала наблюдения, о дате выхода из-под наблюдения – используются для расчёта человеко-лет наблюдения под риском заболеть или умереть. К настоящему времени установлена судьба 95,2 % членов регистра (табл. 1). Среди лиц, начавших работать в первое десятилетие, лица с известным ЖС составляют 91,5 %, в последующие периоды найма на работу доля лиц с известным ЖС растёт и составляет более 96 %, в когорте работников 2000–2016 годов найма достигает 99,9 %. Высокий процент людей с установленным жизненным статусом – несомненное преимущество данного регистра. Процент "неизвестных" среди лиц, начавших работать раньше, выше, что естественно, поскольку многие уволились, вышли на пенсию и уехали в другие населённые пункты, где могли неоднократно сменить место жительства. Число человеко-лет наблюдения под риском во всем регистре персонала составляет 1207600,8.

В табл. 2 представлены данные о числе и проценте лиц, включённых в регистр, статус которых по состоянию на 31.12.2018 – "живые". Из лиц с известной судьбой 16407 чел. живы, что составляет 47,2 %. На долю лиц, проживающих в настоящее время в городе, приходится 84,7 %, а на долю выехавших на другие территории – 15,3 %.

Организация сбора информации и установления даты и причины смерти

Отдалённые последствия профессиональ-

ного радиационного воздействия могут быть оценены по показателям смертности, поэтому важно получать сведения о том, когда и от какой причины умер человек, включённый в регистр персонала ПО "Маяк".

В табл. 3 представлена информация о случаях смерти среди персонала ПО "Маяк" в зависимости от года найма по полу и по месту смерти по состоянию на 31.12.2018. Данные табл. 3 показывают, что во всём регистре персонала умерли 18331 чел., что составляет 52,8 % от числа лиц с известным жизненным статусом. Из них 14165 (77,3 %) мужчин и 4166 (22,7 %) женщин. При анализе абсолютных значений умерших мужчин и женщин выявлено, что число умерших мужчин более чем в 3,4 раза превышает число умерших женщин, что обусловлено значительным преобладанием мужского персонала на предприятии. В городе умерли 11350 чел. (61,9 %), а 6981 – вне города (38,1 %). В табл. 4 представлены данные об установленных причинах смерти в регистре персонала ПО "Маяк". Как следует из данных табл. 4, среди умерших людей причины смерти установлены в 89 % случаев. Среди умерших лиц, приступивших к работе в 1948–1958 гг., причина смерти установлена в 88 % случаев, доля лиц с установленной причиной смерти в когортах 1973–1982 и 2000–2016 годов найма практически одинакова и составляет 94 %. Для умерших в городе причина смерти установлена для 97,5 % от общего числа умерших в городе. Среди мигрантов доля лиц с установленной причиной смерти составляет 75,2 %, что обусловлено невозможностью получения информации о причине смерти или её запаздыванием на 1–3 года в связи с тем, что первоначально становятся известными сведения о дате и месте смерти, а затем проводятся процедуры поиска причин смерти.

Проведён сбор и верифицирована информация о причинах смерти от злокачественных новообразований среди лиц, включённых в регистр по состоянию на 31.12.2018. В табл. 5 представлены данные о случаях смерти от ЗНО среди персонала. Зарегистрировано 3943 случая смерти от рака (3033 случая смерти от ЗНО среди мужчин и 910 случаев смерти среди женщин), что составляет 24,2 % от числа случаев смерти с установленной причиной.

Таблица 1

Количественная характеристика регистра персонала ПО "Маяк"
и распределение лиц по когортам по году начала работы

Годы начала работы		1948–2016		1948–1958		1959–1972		1973–1982		1983–1999		2000–2014		2015–2016	
Показатели	Пол	абс.	%	абс.	%*	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Число людей в регистре	М	27216	100	9267	34,0	6659	24,5	3316	12,2	3542	13,1	3850	14,1	582	2,1
	Ж	9264	100	3657	39,5	1570	16,9	1100	11,9	1234	13,3	1488	16,1	215	2,3
	Оба	36480	100	12924	35,4	8229	22,6	4416	12,1	4776	13,1	5338	14,6	797	2,2
Число людей с известным жизненным статусом	М	25834	100	8459	32,7	6356	24,6	3252	12,6	3409	13,3	3777	14,6	581	2,2
	Ж	8904	100	3362	37,8	1549	17,4	1095	12,3	1212	13,6	1471	16,5	215	2,4
	Оба	34738	100	11821	34,0	7905	22,8	4347	12,5	4621	13,3	5248	15,1	796	2,3
% от общего числа людей	М	94,9	–	91,3	–	95,4	–	98,1	–	96,2	–	98,1	–	99,8	–
	Ж	96,1	–	91,9	–	98,7	–	99,5	–	98,2	–	98,9	–	100,0	–
	Оба	95,2	–	91,5	–	96,1	–	98,4	–	96,8	–	98,3	–	99,9	–
Человеко-лет наблюдения	М	874459,5	100	367160,3	42,1	263840,9	30,2	114901,5	13,1	87062,0	10,0	39945,1	4,6	1549,7	0,2
	Ж	333141,3	100	178552,4	53,6	67117,8	20,1	39900,9	12,0	32607,7	9,8	14333,8	4,3	628,7	0,2
	Оба	1207600,8	100	545712,7	45,2	330958,7	27,4	154802,4	12,8	119669,7	9,9	54278,9	4,5	2178,4	0,2

Таблица 2

Распределение лиц с жизненным статусом "живые" по когортам
в зависимости от места нахождения (по состоянию на 31.12.2018)

Годы начала работы		1948–2016		1948–1958		1959–1972		1973–1982		1983–1999		2000–2014		2015–2016	
Показатели	Пол	абс.	%	абс.	%*	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Число людей в регистре со статусом "живые"	М	11669	100	881	7,5	1915	16,4	1941	16,6	2726	23,4	3627	31,1	579	5,0
	Ж	4738	100	671	14,2	590	12,5	749	15,7	1060	22,4	1453	30,7	215	4,5
	Оба	16407	100	1552	9,5	2505	15,3	2690	16,3	3786	23,1	5080	31,0	794	4,8
% от числа лиц с известным жизненным статусом	М	45,2	–	10,4	–	30,1	–	59,7	–	80,0	–	96,0	–	99,7	–
	Ж	53,2	–	20,0	–	38,1	–	68,4	–	87,5	–	98,8	–	100,0	–
	Оба	47,2	–	13,1	–	31,7	–	61,9	–	81,9	–	96,8	–	99,7	–
проживают вне города (мигранты)	М	1915	100	576	30,1	802	41,8	301	15,7	187	9,8	42	2,2	7	0,4
	Ж	596	100	371	62,1	128	21,5	48	8,1	45	7,6	3	0,5	1	0,2
	Оба	2511	100	947	37,7	930	37,0	349	13,9	232	9,3	45	1,8	8	0,3
% от общего числа живых	М	16,4	–	65,4	–	41,9	–	15,5	–	6,9	–	1,2	–	1,2	–
	Ж	12,6	–	55,3	–	21,7	–	6,4	–	4,2	–	0,2	–	0,5	–
	Оба	15,3	–	61,0	–	37,1	–	13,0	–	6,1	–	0,9	–	1,0	–
проживают в городе (резиденты)	М	9754	100	305	3,1	1113	11,4	1640	16,8	2539	26,0	3585	36,8	572	5,9
	Ж	4142	100	300	7,2	462	11,2	701	16,9	1015	24,5	1450	35,0	214	5,2
	Оба	13896	100	605	4,4	1575	11,3	2341	16,8	3554	25,6	5035	36,2	786	5,7
% от общего числа живых	М	83,6	–	34,6	–	58,1	–	84,5	–	93,1	–	98,8	–	98,8	–
	Ж	87,4	–	44,7	–	78,3	–	93,6	–	95,8	–	99,8	–	99,5	–
	Оба	84,7	–	39,0	–	62,9	–	87,0	–	93,9	–	99,1	–	99,0	–

Таблица 3

Распределение случаев смерти в регистре персонала ПО "Маяк"
в зависимости от года найма (по состоянию на 31.12.2018)

Годы начала работы		1948–2016		1948–1958		1959–1972		1973–1982		1983–1999		2000–2016	
Показатели	Пол	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Число случаев смерти	М	14165	100	7578	53,5	4441	31,4	1311	9,3	683	4,7	152	1,1
	Ж	4166	100	2691	64,6	959	23,0	346	8,3	152	3,6	18	0,5
	Оба	18331	100	10269	56,0	5400	29,5	1657	9,0	835	4,6	170	0,9
% от числа лиц с известным жизненным статусом	М	54,8	–	89,6	–	69,9	–	40,3	–	20,0	–	4,0	–
	Ж	46,8	–	80,0	–	61,9	–	31,6	–	12,5	–	1,2	–
	Оба	52,8	–	86,9	–	68,3	–	38,1	–	18,1	–	3,2	–
Число случаев смерти в городе	М	8541	100	3741	43,8	2856	33,4	1151	13,5	646	7,6	147	1,7
	Ж	2809	100	1466	52,2	848	30,2	328	11,7	149	5,3	18	0,6
	Оба	11350	100	5207	45,9	3704	32,6	1479	13,0	795	7,1	165	1,4
% от общего числа случаев смерти	М	60,3	–	49,4	–	64,3	–	87,8	–	94,6	–	96,7	–
	Ж	67,4	–	54,5	–	88,4	–	94,8	–	98,0	–	100,0	–
	Оба	61,9	–	50,7	–	68,6	–	89,3	–	95,2	–	97,0	–
Число случаев смерти вне города	М	5624	100	3837	68,2	1585	28,2	160	2,8	37	0,7	5	0,1
	Ж	1357	100	1225	90,3	111	8,2	18	1,3	3	0,2	0	0
	Оба	6981	100	5062	72,5	1696	24,3	178	2,5	40	0,6	5	0,1
% от общего числа случаев смерти	М	39,7	–	50,6	–	35,7	–	12,2	–	5,4	–	3,3	–
	Ж	32,6	–	45,5	–	11,6	–	5,2	–	2,0	–	0,0	–
	Оба	38,1	–	49,3	–	31,4	–	10,7	–	4,8	–	3,0	–

Таблица 4

Распределение случаев смерти, причина которых установлена,
в зависимости от года начала работы

Годы начала работы		1948–2016		1948–1958		1959–1972		1973–1982		1983–1999		2000–2016	
Показатели	Пол	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Причина смерти установлена*	М	12659	100	6764	53,4	3917	30,9	1216	9,7	621	4,9	141	1,1
	Ж	3658	100	2269	62,0	898	24,5	332	9,1	142	3,9	17	0,5
	Оба	16317	100	9033	55,4	4815	29,5	1548	9,4	763	4,7	158	1,0
% от общего числа умерших людей	М	89,4	–	89,3	–	88,2	–	92,8	–	90,9	–	94,0	–
	Ж	87,8	–	84,3	–	93,6	–	96,0	–	93,4	–	94,4	–
	Оба	89,0	–	88,0	–	89,2	–	93,4	–	91,4	–	94,0	–
Причина смерти установлена в городе	М	8324	100	3699	44,4	2780	33,4	1107	13,3	600	7,2	138	1,7
	Ж	2744	100	1438	52,4	828	30,2	320	11,7	141	5,1	17	0,6
	Оба	11068	100	5137	46,4	3608	32,6	1427	12,9	741	6,7	155	1,4
% от числа лиц, умерших в городе	М	97,5	–	98,9	–	97,3	–	96,2	–	92,9	–	93,9	–
	Ж	97,7	–	98,1	–	97,6	–	97,6	–	94,6	–	94,4	–
	Оба	97,5	–	98,7	–	97,4	–	96,5	–	93,2	–	93,9	–
Причина смерти установлена вне города	М	4335	100	3065	70,7	1137	26,2	109	2,5	21	0,5	3	0,1
	Ж	914	100	831	90,9	70	7,7	12	1,3	1	0,1	0	0
	Оба	5249	100	3896	74,2	1207	23,0	121	2,3	22	0,4	3	0,1
% от числа лиц, умерших вне города	М	77,1	–	79,9	–	71,7	–	68,1	–	56,8	–	60,0	–
	Ж	67,4	–	67,8	–	63,1	–	66,7	–	33,3	–	–	–
	Оба	75,2	–	77,0	–	71,2	–	68,0	–	55,0	–	60,0	–

Самый высокий процент случаев смерти от злокачественных новообразований установлен для лиц 1948–1972 годов найма, который составляет 26,9 %, а доля лиц в остальных когортах по годам найма практически не различается и составляет примерно 20 %. Доля лиц, умерших от солидных раков и гемолимфобластозов практически не зависит от периода найма и составляет 94,2 % и 5,8 % соответственно от числа лиц, умерших от ЗНО. При анализе места смерти от онкологической патологии выяснено, что 31,2 % случаев смерти от ЗНО произошли вне города.

Случаи заболевания злокачественными новообразованиями

Данные обо всех случаях онкологических заболеваний в регистре персонала ПО "Маяк" получены за период 1948–2017 гг., учтены все случаи заболеваемости ЗНО, диагностированные у людей в период проживания в городе. Источниками информации о случаях заболеваний служили медицинские документы (амбулаторные карты), а также документы хирургиче-

ской (операционные журналы), онкологической (контрольные карты) служб, цитологической и патологоанатомической лабораторий КБ № 71 (ранее ЦМСЧ № 71) г. Озёрска. На основе указанных источников информации в ЮУрИБФ создан территориальный ретроспективный регистр рака [16, 17], включающий все случаи ЗНО среди коренного населения г. Озёрска за период с 1948 по 2017 гг.

В табл. 6 представлены данные о случаях заболевания ЗНО среди лиц, включённых в регистр персонала ПО "Маяк". Как следует из табл. 6, за весь период наблюдения было диагностировано 4042 случая заболевания без учёта немеланомных опухолей кожи ЗНО, в том числе среди мужчин 2904 случая (71,9 %), среди женщин 1138 случаев (28,1 %). Среди работников, нанятых в штат предприятия в 2015–2016 гг., не зарегистрировано ни одного случая рака. 49,3 % онкологических заболеваний зафиксировано в когорте 1948–1958 годов найма, где присутствуют лица более старшего возраста. Как следует из данных таблицы 6, в структуре заболеваемости ЗНО преобладали солидные раки, которые составляли как для мужчин, так

Таблица 5

Распределение случаев смерти от злокачественных новообразований в регистре персонала ПО "Маяк" в зависимости от года начала работы

Годы начала работы		1948–2016		1948–1958		1959–1972		1973–1982		1983–1999		2000–2016	
Показатели	Пол	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Число случаев смерти от ЗНО**	М	3033	100	1850	61,0	840	27,7	222	7,3	91	3,0	30	1,0
	Ж	910	100	581	63,8	172	18,9	100	11,0	49	5,4	8	0,9
	Оба	3943	100	2431	61,6	1012	25,6	322	8,2	140	3,6	38	1,0
% от числа случаев с установленной причиной смерти	М	24,0	—	27,4	—	21,4	—	18,3	—	14,7	—	21,3	—
	Ж	24,9	—	25,6	—	19,2	—	30,1	—	34,5	—	47,1	—
	Оба	24,2	—	26,9	—	21,0	—	20,8	—	18,3	—	24,1	—
Число случаев смерти от солидных раков	М	2863	100	1740	60,8	805	28,1	204	7,1	85	3,0	29	1,0
	Ж	850	100	541	63,6	161	18,9	94	11,2	47	5,5	7	0,8
	Оба	3713	100	2281	61,4	966	26,0	298	8,0	132	3,6	36	1,0
% от числа умерших от ЗНО	М	94,4	—	94,1	—	95,8	—	91,9	—	93,4	—	96,7	—
	Ж	93,4	—	93,1	—	93,6	—	94,0	—	95,9	—	87,5	—
	Оба	94,2	—	93,8	—	95,5	—	92,5	—	94,3	—	94,7	—
Число случаев смерти от гемобластозов	М	170	100	110	64,7	35,0	20,6	18	10,6	6	3,5	1	0,6
	Ж	60	100	40	66,7	11,0	18,3	6	10,0	2	3,3	1	1,7
	Оба	230	100	150	65,2	46,0	20,0	24	10,4	8	3,5	2	0,9
% от числа умерших от ЗНО	М	5,6	—	5,9	—	4,2	—	8,1	—	6,6	—	3,3	—
	Ж	6,6	—	6,9	—	6,4	—	6,0	—	4,1	—	12,5	—
	Оба	5,8	—	6,2	—	4,5	—	7,5	—	5,7	—	5,3	—

Таблица 6

Распределение случаев заболевания злокачественными новообразованиями среди работников ПО "Маяк" в зависимости от года начала работы

Годы начала работы		1948–2016		1948–1958		1959–1972		1973–1982		1983–1999		2000–2016	
Показатели	Пол	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Число случаев заболеваний ЗНО	М	2904	100	1454	50,1	896	30,9	326	11,2	163	5,6	65	2,2
	Ж	1138	100	540	47,5	273	24,0	170	14,9	117	10,3	38	3,3
	Всего	4042	100	1994	49,3	1169	28,9	496	12,3	280	7,0	103	2,5
Число случаев заболеваний солидными раками	М	2730	100	1363	49,9	854	31,3	302	11,1	150	5,5	61	2,2
	Ж	1077	100	511	47,4	256	23,8	162	15,1	112	10,4	36	3,3
	Всего	3807	100	1874	49,2	1110	29,2	464	12,2	262	6,9	97	2,5
% от числа общего числа случаев заболеваний ЗНО	М	94,0	–	93,7	–	95,3	–	92,6	–	92,0	–	93,8	–
	Ж	94,6	–	94,6	–	93,8	–	95,3	–	95,7	–	94,7	–
	Всего	94,2	–	94,0	–	95,0	–	93,5	–	93,6	–	94,2	–
Число случаев заболеваний гемобластозами	М	174	100	91	52,3	42	24,1	24	13,8	13	7,5	4	2,3
	Ж	61	100	29	47,5	17	27,9	8	13,1	5	8,2	2	3,3
	Всего	235	100	120	51,1	59	25,1	32	13,6	18	7,7	6	2,5
% от числа общего числа случаев заболеваний ЗНО	М	6,0	–	6,3	–	4,7	–	7,4	–	8,0	–	6,2	–
	Ж	5,4	–	5,4	–	6,2	–	4,7	–	4,3	–	5,3	–
	Всего	5,8	–	6,0	–	5,0	–	6,5	–	6,4	–	5,8	–

и для женщин около 94 %. Соответственно, на долю гемобластозов приходится чуть более 5 %. Эти результаты хорошо совпадают с данными национальной статистики [18]. Обращает на себя внимание высокий удельный вклад гемобластозов в первое десятилетие. Высокая частота гемобластозов, и в частности лейкоза, среди персонала основных заводов ПО "Маяк" в первое десятилетие его деятельности достаточно хорошо известна благодаря исследованиям, выполненным в ЮУрИБФ [19, 20].

Половозрастное распределение случаев заболевания ЗНО в регистре представлено в табл. 7. Высок процент лиц с онкологической патологией среди мужчин старше 60 лет, а среди женщин – старше 65 лет, что соответствует национальным данным [18].

Дозиметрические данные

Данные о количественном распределении членов регистра контролируемых по дозам внешнего облучения представлены в табл. 8, в табл. 9 представлено распределение регистран-

Таблица 7

Половозрастное распределение случаев заболевания злокачественными новообразованиями среди персонала ПО "Маяк"

Возраст	Мужчины		Женщины		Всего	
	абс.	%	абс.	%	абс.	%
17–24	22	0,8	4	0,4	26	0,6
25–29	31	1,1	6	0,5	37	0,9
30–34	49	1,7	14	1,2	63	1,6
35–39	67	2,3	35	3,1	102	2,5
40–44	101	3,5	55	4,8	156	3,9
45–49	189	6,5	77	6,8	266	6,6
50–54	285	9,8	108	9,5	393	9,7
55–59	371	12,7	146	12,8	517	12,8
60–64	495	17,0	151	13,3	646	16,0
65–69	470	16,2	162	14,2	632	15,6
70–74	404	13,9	144	12,7	548	13,6
75+	420	14,5	236	20,7	656	16,2
Итого	2904	100,0	1138	100,0	4042	100,0

тов с данными биофизического исследования.

Как видно из табл. 8-9 в регистре высок процент людей, контролирующихся по внешнему γ -излучению, который составляет среди мужчин 68,4 %, среди женщин 57,8 %. Доля контролировавшихся по внутреннему α -излучению составляет среди мужчин 20,6 %, среди женщин – 26,3 %.

Для проводимых нами исследований наибольшее значение представляют суммарная доза γ -излучения и дозы за каждый год работы. В табл. 10 представлено распределение средней суммарной дозы γ -излучения в зависимости от года начала работы, дозовые нагрузки в разные периоды эксплуатации ПО "Маяк" существенно отличались. Более высокие значения сум-

Таблица 8

Распределение членов регистра контролируемых по дозам внешнего и внутреннего облучения в зависимости от периода начала работы (архивные данные)

Годы начала работы		1948–2016		1948–1958		1959–1972		1973–1982		1983–1999		2000–2016	
Показатели	Пол	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Кол-во лиц с данными ИДК	М	18623	100	7684	41,3	5337	28,7	2638	14,2	2512	13,5	452	2,3
	Ж	5351	100	2780	52,0	983	18,4	733	13,7	770	14,4	85	1,6
	Оба	23974	100	10464	43,6	6320	26,4	3371	14,1	3282	13,7	537	2,1
% от общего числа лиц	М	68,4	–	82,9	–	80,1	–	79,6	–	70,9	–	11,7	–
	Ж	57,8	–	76,0	–	62,6	–	66,6	–	62,4	–	5,7	–
	Оба	65,7	–	81,0	–	76,8	–	76,3	–	68,7	–	10,1	–
Кол-во лиц с данными биофизического обследования	М	5606	100	2329	41,5	2101	37,5	1026	1,8	110	2,0	40	0,7
	Ж	2437	100	1126	46,2	728	29,9	501	2,1	73	3,0	9	0,4
	Оба	8043	100	3455	43,0	2829	35,2	1527	1,9	183	2,3	49	0,6
% от общего числа лиц	М	20,6	–	25,1	–	31,6	–	30,9	–	3,1	–	1,0	–
	Ж	26,3	–	30,8	–	46,4	–	45,5	–	5,9	–	0,6	–
	Оба	22,0	–	26,7	–	34,4	–	34,6	–	3,8	–	0,9	–

Таблица 9

Распределение членов регистра контролируемых по дозам внешнего и внутреннего облучения в зависимости от периода начала работы (Дозы-2013)

Годы начала работы		1948–2016		1948–1958		1959–1972		1973–1982		1983–1999		2000–2016	
Показатели	Пол	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%	абс.	%
Кол-во лиц с данными ИДК	М	18222	100	8662	47,5	6142	33,7	2937	16,1	345	1,9	136	0,8
	Ж	5622	100	3293	58,6	1252	22,3	930	16,5	124	2,2	23	0,5
	Оба	23844	100	11955	50,1	7394	31,0	3867	16,2	469	2,0	159	0,7
% от общего числа лиц	М	67,0	–	93,5	–	92,2	–	88,6	–	9,7	–	3,5	–
	Ж	60,7	–	90,0	–	79,7	–	84,5	–	10,0	–	1,5	–
	Оба	65,4	–	92,5	–	89,9	–	87,6	–	9,8	–	3,0	–
Кол-во лиц с данными биофизического обследования	М	5606	100	2329	41,5	2101	37,5	1026	18,3	110,0	2,0	40,0	0,7
	Ж	2437	100	1126	46,2	728	29,9	501	20,6	73,0	2,9	9,0	0,4
	Оба	8043	100	3455	43,0	2829	35,2	1527	19,0	183,0	2,2	49,0	0,6
% от общего числа лиц	М	20,6	–	25,1	–	31,6	–	30,9	–	3,1	–	1,0	–
	Ж	26,3	–	30,8	–	46,4	–	45,5	–	5,9	–	0,6	–
	Оба	22,0	–	26,7	–	34,4	–	34,6	–	3,8	–	0,9	–

марной дозы внешнего облучения регистрировались у лиц, приступивших к работе в период 1948–1958 гг. По архивным данным суммарная доза внешнего облучения составляла у мужчин 1232,3 мЗв, у женщин – 1071,1 мЗв (по системе "Дозы-2013" у мужчин – 1018,7 мЗв, у женщин – 783,4 мЗв). В последующие годы найма дозовая нагрузка существенно снижалась.

В табл. 11 показано распределение средней максимальной годовой дозы γ -излучения в зависимости от года начала работы. В отношении динамики изменения средних максимальных годовых доз внешнего облучения у работников ПО "Маяк" самые высокие регистрировались среди персонала 1948–1958 годов найма (по архивным данным у мужчин – 486,8 мЗв, у женщин – 435,7 мЗв; по системе "Дозы-2013" у

мужчин – 358,5, у женщин – 293,0), постепенно снижаясь к 1983 г. Дозовые нагрузки значительно снизились по сравнению с годами, когда производство находилось в стадии становления и отработки технологических процессов.

Известно, что среднее значение дозы профессионального облучения может дать только ориентировочное представление об уровнях радиационного воздействия. Гораздо более информативны данные о распределении персонала в зависимости от дозы внешнего излучения. Данные, представленные в табл. 12, свидетельствуют о том, что 10308 чел. по архивным данным (8138 чел. – "Дозы-2013") имели измеренную накопленную дозу внешнего γ -излучения менее 100 мЗв, и 4383 чел. (4532 чел. – "Дозы-2013") имели суммарную

Таблица 10

Распределение средней суммарной дозы γ -излучения в зависимости от года начала работы, мЗв

Пол	1948–2016	1948–1958	1959–1972	1973–1982	1983–1999	2000–2016
Архивные данные						
М	597,0 (0,01–11293,3)	1232,3 (0,1–11293,3)	232,3 (0,1–7018,5)	94,2 (0,1–4023,0)	59,2 (0,01–2130,5)	24,9 (0,01–454,2)
Ж	602,5 (0,02–9415,1)	1071,1 (0,2–9415,1)	176,6 (0,2–5355,4)	61,7 (0,1–1716,1)	34,0 (0,06–400,8)	16,7 (0,02–145,5)
"Дозы-2013"						
М	592,6 (0,03–10938,9)	1018,7 (0,1–10938,9)	258,3 (0,03–4658,6)	114,7 (0,07–2415,2)	117,2 (0,2–1822,0)	76,1 (0,4–537,8)
Ж	510,8 (0,06–8857,4)	783,4 (0,1–8857,4)	171,8 (0,06–4051,6)	72,5 (0,07–1797,0)	61,5 (0,07–367,9)	85,9 (0,3–277,1)

Таблица 11

Распределение средней максимальной годовой дозы γ -излучения в зависимости от года начала работы, мЗв

Пол	1948–2016	1948–1958	1959–1972	1973–1982	1983–1999	2000–2016
Архивные данные (min–max)						
М	222,7 (0,01–8439,0)	486,8 (0,1–8439,0)	61,1 (0,1–3222,0)	18,8 (0,1–1540,0)	11,1 (0,01–1000,0)	5,9 (0,01–56,7)
Ж	237,7 (0,01–4629,0)	435,7 (0,2–4629,0)	47,1 (0,2–2587,9)	12,6 (0,1–858,5)	6,4 (0,06–132,6)	3,6 (0,02–19,8)
"Дозы-2013" (min–max)						
М	194,8 (0,03–6802,2)	358,5 (0,1–6802,2)	61,1 (0,03–2584,1)	20,4 (0,07–908,4)	21,0 (0,2–564,1)	12,7 (0,4–63,6)
Ж	182,8 (0,1–4298,5)	293,0 (0,1–4298,5)	39,3 (0,1–1947,8)	12,9 (0,1–803,6)	9,4 (0,1–150,0)	13,4 (0,3–32,0)

Таблица 12

Распределение персонала в зависимости от суммарной дозы внешнего γ -излучения

Пол	Дозы архивные, мЗв					
	0	> 0–100	> 100–200	> 200–500	> 500–1000	> 1000
М	8593	7881	2389	3068	1940	3345
Ж	3913	2427	664	685	537	1038
Всего	12506	10308	3053	3753	2477	4383
"Дозы-2013", мЗв						
М	8994	6092	2590	3581	2389	3570
Ж	3642	2046	855	1031	728	962
Всего	12636	8138	3445	4612	3117	4532

Таблица 13

Распределение персонала в зависимости от максимальной годовой дозы внешнего γ -излучения

Пол	Дозы архивные, мЗв					
	0	> 0–100	> 100–200	> 200–500	> 500–1000	> 1000
М	8593	12708	1526	2086	1170	1133
Ж	3913	3471	397	686	440	357
Всего	12506	16179	1923	2772	1610	1490
"Дозы-2013", мЗв						
М	8994	11666	2104	2493	1252	707
Ж	3642	3520	597	902	439	164
Всего	12636	15186	2701	3395	1691	871

дозу более 1000 мЗв. Распределение персонала по максимальной годовой дозе γ -облучения показано в табл. 13, данные которой свидетельствуют о том, что 16179 чел. (15186 чел. – "Дозы-2013") имели измеренную накопленную дозу внешнего γ -излучения менее 100 мЗв, и 1490 чел. по архивным данным (871 чел. – "Дозы-2013") имели максимальную годовую дозу более 1000 мЗв.

Контакт с плутонием имели работники радиохимического и плутониевого заводов. Результаты о содержании плутония в организме среди обследованного персонала представлены в табл. 14–15. Как видно из данных табл. 14, из обследованных 8043 чел. содержание плутония в организме у 5836 чел. (72,6 %) было ниже 0,525 кБк, а у 578 чел. (7,2 %) – выше 2,708 кБк. В табл. 15 представлено распределение персонала ПО "Маяк" в зависимости от среднего содержания ^{239}Pu в организме и периода начала работы. Как следует из табл. 15 содержание

плутония среди лиц, нанятых на предприятие в период 1948–1958 гг., составляет 1769,0 Бк у мужского персонала комбината и 2128,2 Бк у женского.

Среднее содержание плутония в период начиная с 1973 г. у мужчин снизилось почти в 11 раз, а у женщин – в 25 раз.

В табл. 16 представлены данные о распределении персонала в зависимости от дозы

Таблица 14

Распределение персонала регистра в зависимости от содержания ^{239}Pu в организме

Пол	Содержание ^{239}Pu в организме, кБк				
	Всего	0,200–0,525	0,526–1,069	1,070–2,708	> 2,708
М	5606	3977	634	574	421
Ж	2437	1859	263	158	157
Всего	8043	5836	897	732	578

Таблица 15

Распределение персонала ПО "Маяк" в зависимости от среднего содержания ^{239}Pu в организме и периода начала работы

Пол	Годы начала работы, среднее содержание ^{239}Pu в организме, Бк					
	1948–2016	1948–1958	1959–1972	1973–1982	1983–1999	2000–2016
М	946,9 (0,002–43458,7)	1769,0 (0,4–43458,7)	480,3 (0,002–24182,7)	158,4 (0,002–3535,7)	126,4 (0,003–1145,0)	69,2 (0,1–310,0)
Ж	1079,1 (0,002–45518,8)	2128,2 (0,002–45518,8)	248,8 (0,002–39683,1)	84,4 (0,002–2449,2)	129,8 (0,8–3352,9)	49,1 (2,7–103,2)

Таблица 16

Распределение персонала в зависимости от дозы α -излучения в органах основного депонирования плутония

Пол	Дозы, Гр							
	> 0–0,025	> 0,025–0,05	> 0,05–0,1	> 0,1–0,15	> 0,15–0,25	> 0,25–0,5	> 0,5–1,0	$\geq 1,0$
Доза на лёгкое								
М	2440	843	775	361	418	363	200	206
Ж	1158	364	308	161	138	113	78	117
Всего	3598	1207	1083	522	556	476	278	323
Доза на печень								
М	2739	772	663	347	344	350	201	190
Ж	1143	305	263	134	189	180	96	126
Всего	3882	1077	926	481	533	530	297	316
Доза на скелет								
М	1420	581	762	456	546	622	489	730
Ж	619	210	303	178	213	248	252	413
Всего	2039	791	1065	634	759	870	741	1143

внутреннего облучения лёгких, скелета, печени от инкорпорированного плутония. Дозы α -излучения превышали 1 Гр в лёгких среди 3,7 % обследованных мужчин и 4,8 % женщин, в печени – у 3,4 % мужчин и 5,2 % женщин, в скелете среди 13,0 % мужского персонала и 16,9 % женского. Дозы α -излучения менее 0,025 Гр в лёгких имели 44,7 % обследованных лиц, в печени – 48,3 %, в скелете – 25,4 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При ведении регистра персонала ПО "Маяк" необходимо обеспечивать условия конфиденциальности, что достигается следующими проводимыми мероприятиями:

- ограниченный и хорошо определённый доступ в помещение с компьютерами;

- ограниченный и хорошо определённый доступ к компьютерам с паролями для получения доступа к информации;

- регистрация компьютерного времени для каждого санкционированного доступа;

- отделение файла фамилий от других файлов;

- обеспечение средств идентификации персонала регистра;

- особо внимательное соблюдение конфиденциальности данных при сборе, передаче, хранении, выдаче;

- осуществление мер контроля для всех выходных данных, позволяющих идентификацию случаев.

Регистр персонала ПО "Маяк" является единственным в мире регистром работников ядерного предприятия, подвергшихся хрониче-

скому радиационному воздействию, в котором диапазон доз достаточен для надёжной оценки риска пролонгированного профессионального облучения, а также единственным в мире регистром, включающим лиц с измеренными дозами внутреннего облучения от плутония, достаточными для того, чтобы оценить риск, связанный с инкорпорацией плутония в организм человека. Регистр персонала ПО "Маяк" уникален и тем, что облучению подвергались как мужчины, так и женщины в различном диапазоне возрастов, жизненный статус установлен для 95,2 % лиц, работники получали одинаковое медицинское обслуживание закрытого города, время наблюдения составляет более 70 лет (1207600,8 человеко-лет наблюдения).

В ходе работ по ведению регистра персонала ПО "Маяк" возникли следующие проблемы и трудности:

- сбор данных о жизненном статусе (адрес, дата и причина смерти), о дозиметрических данных работников ПО "Маяк" затруднён тем, что вышел Федеральный закон № 152-ФЗ от 27.07.2006 г. "О персональных данных";
- для наблюдения потеряны лица, которые выехали в бывшие республики СНГ;
- получение данных о причине смерти осложняется тем, что с 2000 г. в свидетельстве о регистрации смерти не указывается причина смерти.

В настоящее время медико-дозиметрический регистр основных и вспомогательных производств персонала ПО "Маяк" включает данные на 36480 чел., принятых на предприятие в период с 1948–2016 гг., из которых 27216 мужчин и 9264 женщины (25,4 % от общего числа лиц). По состоянию на 31.12.2018 для 34738 чел. (95,2 %) установлен жизненный статус, период эпидемиологического наблюдения составляет более 70 лет. На данный период времени установлено, что 18331 чел. (52,8 % от числа лиц с установленным жизненным статусом) умерли от различных причин, из них от онкологических заболеваний – 24,2 %. Количество заболевших злокачественными новообразованиями – 4042 чел., что составляет 11,1 % от общего количества регистрантов. Из лиц, заболевших ЗНО, 71,8 % – мужчины, 28,2 % – женщины.

Количество лиц с данными индивидуаль-

ного дозиметрического контроля составляет 65,7 % от общего числа лиц в регистре, а количество лиц с данными биофизического обследования составляет 22,0 %. Основная доля лиц – 28,3 % со средней суммарной дозой внешнего облучения менее 100 мЗв, а доля лиц с максимальной годовой дозой γ -излучения менее 100 мЗв составляет 44,4 %. Большая часть работников – 72,6 %, подвергшихся ингаляционному воздействию, имели содержание ^{239}Pu в организме ниже 0,525 кБк.

На основе данных медико-дозиметрического регистра персонала ПО "Маяк" можно оценить канцерогенный риск заболеваемости и смертности от дозы внешнего и внутреннего облучения, а также при сочетанном действии доз облучения для опухолей различной локализации и гистологии. Перспективой ведения и использования регистра является прогнозирование онкологической заболеваемости и смертности, потенциально индуцированной облучением. Организация регулярного сбора информации о жизненном статусе, миграции, состоянии здоровья и причинах смерти позволяет существенно повысить качество информационного обеспечения научных работ, направленных на изучение последствий действия радиации на организм человека. Продолжение этих работ позволит оценить риски облучения в широком диапазоне доз при внешнем и внутреннем облучении при различных сценариях поступления радионуклидов, что обеспечит научное обоснование нормирования воздействия производственных факторов на здоровье персонала, а также внедрить результаты в практику рекомендательного профотбора, в том числе при аварийных ситуациях. Использование данных регистра позволит проведение прицельного онкоскрининга облучённых лиц с профилактической целью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ядерная индустрия России / Под ред. А.М. Петросьянц. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 381 с.
2. Федеральное государственное унитарное предприятие "Производственное объединение "Маяк" Предприятие госкорпорации "Росатом" [Электронный ресурс]. <https://www.po-mayak.ru/about/>. (Дата обращения: 30.08.2019).

3. Ильин Л.А., Киселев М.Ф., Панфилов А.П. Медико-дозиметрический регистр работников атомной промышленности России. Состояние и перспективы // Бюллетень сибирской медицины. – 2005 – № 2. – С. 6–13.
4. Ильин Л., Киселев М., Кочетков О. и др. Медико-дозиметрический регистр персонала Минатома России // Бюллетень по атомной энергии. – 2003. – № 9. – С. 28–31.
5. Ильин Л.А., Киселёв М.Ф., Панфилов А.П. и др. Отраслевой медико-дозиметрический регистр работников атомной промышленности России. Состояние и перспективы // Мед. радиология и радиац. безопасность. – 2003. – Т. 48. – № 5. – С. 16–22.
6. Koshurnikova N.A., Shilnikova N.S., Okatenko P.V. et al. Characteristics of the cohort of workers at the Mayak nuclear complex // Radiation Research. – 1999. – V. 152. – No. 4. – P. 352–363.
7. Кошурникова Н.А., Шильникова Н.С., Окатенко П.В. и др. Характеристика когорты рабочих атомного предприятия ПО "Маяк" // Мед. радиология и радиац. безопасность. – 1998. – Т. 43. – № 6. – С. 43–57.
8. Кошурникова Н.А., Шильникова Н.С., Окатенко П.В. и др. Характеристика когорты рабочих атомного предприятия ПО "Маяк" (часть I) // Вопросы радиац. безопасности. – 1998. – № 2. – С. 46–55.
9. Кошурникова Н.А., Шильникова Н.С., Окатенко П.В. и др. Характеристика когорты рабочих атомного предприятия ПО "Маяк" (часть II) // Вопросы радиац. безопасности. – 1998. – № 3. – С. 48–58.
10. Кошурникова Н.А., Сокольников М.Э., Окатенко П.В., Груздева Е.А., Кабирова Н.Р., Царева Ю.В. База данных "Медико-дозиметрический регистр персонала ФГУП "Производственное объединение "Маяк" // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020620210. – Заявка № 2019622093 от 15.11.2019 г. – Дата государственной регистрации: 05.02.2020 г.
11. Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений // Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87 и основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
12. Vasilenko E.K., Khokhryakov V.F., Miller S.C. et al. Mayak worker dosimetry study: an overview // Health Physics. – 2007. – V. 93. – No. 3. – P. 577–588.
13. Vostrotin V.V., Birchall A., Zhdanov A. et al. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2013): internal dosimetry results // Radiat. Prot. Dosimetry. – 2016. – P. 1–12.
14. Сокольников М.Э., Востротин В.В., Ефимов А.В. и др. Пожизненный риск смерти от рака лёгкого при ингаляции плутония-239 // Мед. радиология и радиац. безопасность. – 2017. – Т. 62. – № 1. – С. 27–31.
15. Sokolnikov M., Preston D., Stram D.O. Mortality from solid cancers other than lung, liver, and bone in relation to external dose among plutonium and non-plutonium workers in the Mayak worker cohort // Radiation and Environmental Biophysics. – 2017. – V. 56. – No. 1. – P. 121–125.
16. Фомин Е.П., Окатенко П.В., Кошурникова Н.А. Опыт ретроспективного создания канцер-регистра для населения г. Озёрска и анализ показателей заболеваемости злокачественными новообразованиями на его основе за период с 1948 по 2005 гг. // Вопросы радиац. безопасности. – 2007. – № 4. – С. 54–62.
17. Кошурникова Н.А., Окатенко П.В., Фомин О.П., Сокольников М.Э. База данных "Канцер-регистр населения Закрытого административно-территориального образования г.Озёрск, Челябинская область" // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621208. – Заявка № 2019621091 от 26.06.2019 г. – Дата государственной регистрации: 08.07.2019 г.
18. Злокачественные новообразования в России и странах СНГ в 2002 г. / Под ред. М.И. Давыдова, Е.М. Аксель. – РАМН. Государственное учреждение Российский Онкологический Научный Центр им. Н.Н. Блохина. – М., 2004. – 279 с.
19. Кузнецова И.С., Кошурникова Н.А. Смертность от лейкоза среди персонала ПО "Маяк" // Вопросы радиац. безопасности. – 2002. – № 1. – С. 46–49.
20. Кошурникова Н.А., Окатенко П.В., Шильникова Н.С., Престон Д. Риск лейкемии при профессиональном внешнем гамма-облучении // Вопросы радиац. безопасности. – 1996. – № 1. – С. 18–21.

УДК 314:321.039

© 2023

О НЕКОТОРЫХ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ НАСЕЛЕНИЯ МОНОГОРОДА АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ОЗЁРСКА

В.И. Тельнов

Россия, г. Озёрск, ФГБУН Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России

Оценка воспроизводства населения является актуальной демографической проблемой в Российской Федерации и её регионах. Целью настоящего исследования явился сравнительный анализ процесса воспроизводства населения моногорода атомной промышленности Озёрска и Российской Федерации. Для анализа использовали широкий комплекс показателей (22) воспроизводства населения, в частности пять показателей численности и возрастно-половой структуры, пять показателей рождаемости, три показателя смертности, пять показателей миграции, четыре показателя депопуляции и темпов их изменения. В результате сравнительного анализа динамики показателей воспроизводства населения Озёрска с 1959 по 2020 гг. установлено, что его исходное состояние было более благоприятным по сравнению с Россией в целом, однако с 2002 г. вследствие высоких темпов ухудшения процесс воспроизводства в Озёрске стал более неблагоприятным. К числу проблем воспроизводства населения в Озёрске относятся более выраженное уменьшение численности населения, увеличение доли женщин в старших возрастах, то есть "демографическое одиночество женщин", повышение индекса возрастной структуры – "старение снизу и сверху" – и темпов его роста, существенное снижение рождаемости и повышение смертности, в том числе возрастной, низкий миграционный прирост. Следствием этих изменений явились отрицательные значения естественного и общего прироста, повышение естественной и общей депопуляции и рост её темпов и, в конечном счёте, суженное воспроизводство и низкая популяционная устойчивость населения города. Наблюдаемые неблагоприятные процессы воспроизводства населения России являются отражением ряда особенностей демографических переходов и второй эпидемиологической революции, обусловленных социальными, политическими и военными катаклизмами XX века в нашей стране. В Озёрске эти процессы обусловлены ещё и меньшими демографическими ресурсами малого моногорода с основным градообразующим предприятием. Сделан вывод о необходимости демографического мониторинга населения Озёрска с информированием общественности и администрации города.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НАСЕЛЕНИЕ ОЗЁРСКА, ВОСПРОИЗВОДСТВО, РОЖДАЕМОСТЬ, СМЕРТНОСТЬ, МИГРАЦИЯ, ПРИРОСТ/УБЫЛЬ НАСЕЛЕНИЯ, ДЕПОПУЛЯЦИЯ, ПОПУЛЯЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Воспроизводство населения в узком смысле – процесс смены поколений в результате естественного движения населения (рождения и смерти); в широком – постоянное возобновление населения на основе естественного движения, миграции, переходов людей из одних социальных групп в другие – один из главных процессов воспроизводства общества. Воспроизводство населения – вероятностный процесс, который образует масса случайных, единичных событий – рождений и смертей. Длительное существование популяций пред-

полагает сохранение фундаментальных условий их взаимодействия с внешней средой, что возможно только в том случае, если поток демографических событий не хаотичен, а определённым образом упорядочен вследствие самоорганизации демографической системы и протекающих в ней процессов управления. С возникновением человеческого общества система управления воспроизведением популяций претерпевает качественный скачок, биологические механизмы управления размножением заменяются социальными (речь идёт

не об индивидуальном уровне – рождение и смерть остаются биологическими феноменами, – а о рождаемости и смертности как массовых явлениях на уровне популяции), складываются устойчивые общественные отношения людей по поводу генерации и сохранения человеческой жизни и начинается воспроизводство населения как социально детерминируемый процесс.

Для стабилизации и последующего улучшения демографической ситуации в нашей стране разработана Концепция демографической политики Российской Федерации на период до 2025 г. [1]. Актуальность исследования обусловлена необходимостью улучшения медико-демографических процессов, ухудшение которых наблюдается в нашей стране с 60-х годов прошлого века и, особенно, в постреформенный период 1990-х годов. Несмотря на положительную динамику после 2010 г., в последние годы вновь наблюдается некоторое ухудшение демографической ситуации в стране. Особенно важной эта проблема является для малых городов, в том числе для закрытых административно-территориальных образований (ЗАТО) Росатома, имеющих значительно меньшие демографические ресурсы [2]. В Озёрске проживали и проживают следующие контингенты облучённых лиц: работники ПО "Маяк", подвергшиеся внешнему и внутреннему профессиональному облучению и их потомки, взрослое и детское население города, подвергшееся радиационному воздействию в результате газо-аэрозольных выбросов и радиационной аварии 1957 года, а также участники ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС [3–7]. Для объективного принятия решений административными органами города необходимы данные с результатами демографических исследований населения, проживающего вблизи радиационно опасного производства (ЗАТО г. Озёрск). Целью настоящего исследования явился сравнительный анализ процесса воспроизводства населения моногорода атомной промышленности Озёрска и Российской Федерации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы для анализа воспроизводства населения Озёрска были получены в ЗАГСе,

отделе статистики администрации города и Челябинскстате, для населения России – в таблицах смертности и демографических ежегодниках России.

Для анализа использовали методы исследования, описанные в ряде источников [8–10]. Одной из наиболее общих количественных демографических характеристик является численность населения. Как правило, большинство демографических исследований начинается с анализа численности населения. Однако сам по себе этот показатель является пассивным итогом ряда демографических процессов. Основное значение данного показателя заключается в грубой оценке демографических процессов, лежащих в его основе. К этим процессам, прежде всего, относятся рождаемость, смертность и миграция населения. Половой состав является показателем соотношения мужчин и женщин, а также числа женщин на 1000 мужчин. Для оценки сдвигов возрастной структуры населения определяли индекс возрастной структуры (ИВС) [11]. Темы роста ИВС рассчитывали как отношение ИВС в текущем году к ИВС в предыдущем году. Первый год наблюдения соответственно принимали за единицу.

При относительно постоянном удельном весе родителей (около 50 %) существенно меняются лишь доли детей и прародителей, которые и определяют тип возрастной структуры. Прогрессивная структура характеризуется высокой долей детей (>22 %) и низкой прародителей (<29 %), что обеспечивает быстрый рост населения. При этом ИВС не превышает 0,90. Стационарная структура со стандартными долями детей (~0,22) и прародителей (~29 %) характеризуется монотонной численностью населения; в этом случае ИВС колеблется от 0,90 до 1,10. Регрессивная структура с низким удельным весом детей (<22 %) и высоким – прародителей (>29 %) не обеспечивает дальнейшего роста населения, что ведёт к снижению его численности, а значения ИВС превышают 1,10. В соответствии с тремя типами возрастной структуры выделяли режимы воспроизводства населения: расширенное воспроизводство (прогрессивная структура) – в каждом следующем поколении (дети) людей больше, чем в предыдущем (родители); простое воспроизводство (стационарная структура) – в последующих по-

колениях людей столько же, сколько в предыдущих; суженное воспроизводство (регрессивная структура) – в последующих поколениях людей меньше, чем в предыдущих [12].

Одним из ведущих показателей воспроизводства населения является рождаемость. Для оценки рождаемости определяли общий коэффициент рождаемости (ОКР) как число родившихся живыми за год на 1000 чел. населения, специальный коэффициент рождаемости (СпКР) как число родившихся за год, приходящихся на 1000 женщин в фертильном возрасте (15–49 лет), нетто-коэффициент воспроизводства населения (чистый коэффициент воспроизводства) – обобщающий показатель режима воспроизводства населения с учётом рождаемости и смертности [13]. Данный коэффициент показывает, сколько в среднем девочек, рождённых одной женщиной на протяжении всей её жизни, дожило бы до возраста матери при их рождении, если бы в каждом возрасте сохранялись уровни рождаемости и смертности данного периода. Также определяли суммарный коэффициент рождаемости (СКР), показывающий, сколько детей родила бы одна женщина в период от 15 до 49 лет. СКР не зависит от половозрастного состава населения, интегрально отражает интенсивность рождений во всех возрастных группах, позволяет оценить характер воспроизводства населения.

При изучении смертности населения использовали общий коэффициент смертности (ОКС) как число умерших за год на 1000 чел. населения, возрастные коэффициенты смертности (ВКС) как число умерших за год на 1000 человек населения в разных возрастных группах. Коэффициент младенческой смертности оценивали как число умерших в возрасте до одного года на 1000 живорождённых в данном календарном году.

Для оценки миграционных процессов определяли коэффициент прибытия (КП) – число прибывших на 1000 чел. населения в среднем за год на данную территорию, коэффициент выбытия (КВ) – число выбывших на 1000 чел. населения в среднем за год с данной территории, коэффициент миграционного прироста/убыли (КМП) как разницу между коэффициентами прибытия и выбытия, а также коэффициент эффективности миграции (КЭМ) – отношение миграционного прироста к миграционному

обороту (сумме прибывших и выбывших) в процентах. Данные текущего учёта миграции стали доступны для изучения сравнительно недавно – с 1989 г., до этого их публикации были сильно ограничены [14]. В связи с этим анализ показателей миграции, а также ряда параметров, в которых учитывалась миграция, проводили с 1990 по 2020 гг. по пятилетиям.

Характер течения перечисленных выше процессов, в конечном счёте, определяет динамику численности населения: её рост, убыль или неизменность. Основными составляющими движения населения являются естественный и общий прирост (убыль) населения и их сочетания, а также ряд коэффициентов, рассчитанных на их основе [13]. Коэффициент естественного прироста (КЕП) населения определяли как разницу между ОКР и ОКС. Так как оба коэффициента рассчитываются на 1000 чел. населения, то и КЕП получается на 1000 чел. населения. Коэффициент общего прироста населения (КОП) определяли как сумму КЕП и КМП населения. Отрицательные значения КЕП и КОП свидетельствуют о естественной и общей убыли населения.

Для характеристики снижения численности населения, то есть его депопуляции, определяли коэффициент естественной депопуляции (КЕД) как отношение ОКС к ОКР, то есть процесс естественной депопуляции. Для оценки депопуляции, учитывающей миграцию населения, определяли коэффициент общей депопуляции (КОД), который показывает, во сколько раз естественное и миграционное убывание населения превышает его естественное и миграционное прибытие. Коэффициенты депопуляции также рассчитывали на 1000 чел. населения.

Для оценки популяционной устойчивости населения за весь период наблюдения определяли средние значения коэффициентов депопуляции и средние геометрические темпов их роста, то есть индексов естественной (ИЕД) и общей (ИОД) депопуляции, на основе их динамики в данном году относительно предыдущего. Популяционную устойчивость при средних значениях коэффициентов и индексов депопуляции меньше единицы оценивали как высокую, равных единице – как промежуточную и больше единицы – как низкую.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследования была рассмотрена динамика численности населения Озёрска с 1959 до 2020 гг. (табл. 1). Следует отметить, что в первые десятилетия численность населения увеличивалась в соответствии с потребностями кадрового обеспечения расширения основного градообразующего предприятия Производственного объединения (ПО) "Маяк" и инфраструктуры города. После 2002 г. численность населения стала снижаться, что было связано, в конечном счёте, с ухудшением социально-экономического положения в Озёрске и

России в целом. Из табл. 1 видно, что признаки половой диспропорции (снижение доли мужчин и повышение доли женщин) наблюдались в течение всего периода наблюдения, особенно в России. При этом число женщин на 1000 мужчин практически всегда превышало 1100.

Общей тенденцией гендерного дисбаланса было его увеличение с повышением возраста (табл. 2). Особенно выраженным гендерный дисбаланс был в старших возрастных группах, что в известной мере создает условия для "демографического одиночества женщин" в старших возрастах. Так, в 2020 г. в группах 60–79 и 80+ лет на 1000 мужчин приходилось 1716 и 3383 женщин в Озёрске и 1747 и 2945

Таблица 1

Динамика численности (тыс. чел.) и половой структуры населения Озёрска и России за годы переписи населения

Годы	Озёрск				Россия			
	<i>n</i>	Муж., %	Жен., %	Жен. на 1000 муж.	<i>n</i>	Муж., %	Жен., %	Жен. на 1000 муж.
1959	51,9	50,2	49,8	992	117590,5	44,6	55,4	1241
1970	59,8	47,9	52,1	1088	130058,5	45,6	54,4	1192
1979	71,2	47,1	52,9	1123	137371,9	46,0	54,0	1174
1989	83,0	47,0	53,0	1128	146976,6	46,7	53,3	1139
2002	85,9	46,5	53,5	1151	144548,5	46,6	53,4	1145
2010	82,2	46,7	53,3	1139	142844,3	46,2	53,8	1164
2020	77,9	47,1	52,9	1125	146748,6*	46,4	53,6	1154

* Повышение численности за счёт населения Крымской республики и Севастополя.

Таблица 2

Сравнительная динамика числа женщин на 1000 мужчин в разных возрастных группах (лет) в Озёрске и России за годы переписи населения

Годы	Возраст, лет									
	0–14	15–49	50–59	60–79	80+	0–14	15–49	50–59	60–79	80+
	Озёрск					Россия				
1959	968	966	1919	3858	3571	967	1206	1938	2205	2778
1970	1037	1037	1983	3214	5727	964	1067	1791	2341	3259
1979	964	971	1218	2441	7600	971	1007	1532	2378	3777
1989	978	1057	1285	1663	5867	968	997	1203	2091	4227
2002	1005	1039	1214	1700	3383	955	1019	1199	1747	4332
2010	925	965	1251	1699	3164	952	1025	1243	1749	3479
2020	982	865	1214	1716	3330	948	995	1189	1614	2945

женщин в России соответственно, тогда как в группе 15–49 лет – всего 865 и 995 женщин соответственно.

Из табл. 3 видно, что с 1959 по 2020 гг. произошло существенное (в 1,5–2 раза) снижение доли детского населения обоих полов (0–14 лет), как в Озёрске, так и в России. Доли лиц в возрасте 15–49 лет снижались в меньшей степени, в целом в 1,1–1,3 раза, причём с определёнными разнонаправленными колебаниями. В отличие от рассмотренных младших групп, в старших возрастных группах (50–59 лет и далее) наблюдалось, за некоторым исключением в 2020 г., постоянное увеличение доли лиц. Перечисленные тенденции были более выражены, во-первых, у женщин по сравнению с мужчинами и, во-вторых, в целом в Озёрске по сравнению с Россией. В 2020 г. по сравнению с 2010 г. в Озёрске и России доли групп 0–14 и 15–49 лет, напротив, повысились, а старших возрастных групп снизились, исключая группу 80+ (долголетие).

В табл. 4 представлена сравнительная динамика индекса возрастной структуры (ИВС) у населения, в которой отражены все три типа возрастной структуры Озёрска и России. Прогрессивная структура, как и тип воспроизводства населения в Озёрске и России, отмечалась до 1989 и 1979 гг., стационарная – в 1989 и 1979–1989 гг., регрессивная – с 2002 г. до настоящего времени соответственно. При этом ИВС неуклонно повышался до 2010 г. у мужчин и женщин Озёрска и России, однако темпы роста показателя в Озёрске были выше (табл. 4). В 2020 г. ИВС и темпы его роста оставались высокими.

Анализ данных по рождаемости свидетельствует о резком снижении ОКР и СпКР в Озёрске и России за 1959–2020 гг. (табл. 5). При этом на протяжении 1959–1989 гг. рождаемость в Озёрске была заметно выше, чем в России, что, очевидно, можно объяснить более молодым составом населения города, основанного в 1945 г.

Таблица 3
Сравнительная динамика возрастной структуры (в %) у мужчин и женщин
Озёрска и России за годы переписи населения

Годы	Возраст, лет									
	0–14		15–49		50–59		60–79		80+	
	М	Ж	М	Ж	М	Ж	М	Ж	М	Ж
Озёрск										
1959	32,8	32,0	60,3	58,7	4,3	5,1	2,5	4,0	0,1	0,2
1970	30,2	28,8	60,5	57,7	5,3	5,9	3,9	6,0	0,1	0,6
1979	25,3	21,7	62,9	54,5	9,7	11,7	5,3	7,8	0,2	1,0
1989	24,9	21,6	52,6	49,3	12,9	13,7	9,3	13,9	0,3	1,6
2002	18,2	15,9	56,9	51,4	10,2	10,7	14,2	20,6	0,5	1,5
2010	15,9	13,3	51,8	42,2	15,1	16,1	15,5	23,6	1,7	4,8
2020	15,7	13,7	52,6	40,8	13,5	14,6	15,8	24,0	2,4	6,9
Россия										
1959	33,3	25,9	53,6	52,1	6,9	10,8	5,7	10,1	0,5	1,1
1970	29,6	24,0	55,4	49,6	7,3	11,0	7,0	13,8	0,6	1,6
1979	23,9	19,8	58,0	49,8	9,6	12,5	7,9	16,1	0,6	1,9
1989	25,2	21,4	52,9	46,3	11,8	12,6	9,4	17,1	0,7	2,7
2002	18,5	15,4	57,7	51,4	9,9	10,3	13,2	20,1	0,7	2,8
2010	16,7	13,7	55,7	49,1	14,4	15,3	11,8	17,8	1,4	4,1
2020	19,5	16,1	50,2	43,9	12,9	13,4	15,2	21,3	2,1	5,4

Таблица 4

Динамика индекса возрастной структуры и средние темпы их повышения у населения Озёрска и России

Годы переписи населения	Озёрск			Россия		
	Мужчины	Женщины	Все	Мужчины	Женщины	Все
1959	0,41	0,54	0,48	0,57	0,82	0,70
1970	0,48	0,69	0,59	0,66	0,95	0,81
1979	0,69	0,86	0,78	0,81	1,12	0,97
1989	0,80	1,00	0,90	0,84	1,11	0,98
2002	1,09	1,35	1,22	1,07	1,37	1,23
2010	1,30	1,66	1,48	1,18	1,50	1,34
2020	1,25	1,59	1,42	1,09	1,38	1,24
Средние темпы прироста, %	21,3	20,5	20,9	12,0	9,5	10,8

Таблица 5

Динамика коэффициентов рождаемости в Озёрске и России

Годы переписи населения	Общий коэффициент рождаемости		Специальный коэффициент рождаемости		Суммарный коэффициент рождаемости	
	Озёрск	Россия	Озёрск	Россия	Озёрск	Россия
1959	34,3	20,4	121,0	67,3	3,77	2,63
1970	20,2	14,8	66,3	49,2	2,43	2,00
1979	18,9	15,9	63,2	55,3	2,17	1,91
1989	13,5	12,7	51,5	49,3	1,89	1,86
2002	8,2	8,3	29,7	29,4	1,13	1,21
2010	10,3	12,5	40,9	58,1	1,19	1,43
2020	6,8	9,8	31,8	46,3	1,16	1,60

Таблица 6

Динамика нетто-коэффициента воспроизводства населения Озёрска и России

Население	Годы переписи населения						
	1959	1970	1979	1989	2002	2010	2020
Озёрска	1,76	1,17	1,03	0,86	0,52	0,57	0,51
России	1,10	0,93	0,87	0,90	0,61	0,75	0,72

Резкое падение рождаемости в Озёрске и России началось в начале 1990-х годов и продолжалось до 2002 г. По оценочной шкале, как видно из табл. 5, ОКР в Озёрске в 1959 г. был высоким (более 30 на 1000 населения), в 1970 – средним (20–24,9), в 1979 – ниже среднего (15–19,9), в 1989 – низким (10–14,9), а с 2002 г. – очень низким (до 10). Сходная динамика ОКР и СпКР характерна и для населения России в целом (табл. 5). Однако темпы роста

рождаемости с 2010 г. в стране были выше, чем в Озёрске. В России по предварительным данным ОКР и СпКР продолжали повышаться, но более медленными темпами [15].

При оценке динамики нетто-коэффициента в Озёрске установлено снижение расширенного воспроизводства населения с 1959 по 1979 гг. и его существенное сужение с 1989 по 2020 гг. от 0,86 до 0,51 (табл. 6). Нетто-коэффициенты в России в 1959 г. были ниже, чем в Озёрске

($R=1,10$ – расширенное воспроизводство), а в 1970–2020 гг. были ниже 1,0 – суженное воспроизводство, но с 2002 г. были выше, чем в Озёрске.

Исходя из представленных в табл. 5 и 6 данных, можно заключить, что в Озёрске до 1990 г. имело место расширенное воспроизводство населения (СКР составлял 2,17–3,77). Начиная с 1990 г. воспроизводство населения перешло на суженный режим, что в целом способствовало началу депопуляции населения. В России, как следует из табл. 6, этот процесс начался значительно раньше, а именно с 1965 г.

По сравнению с рождаемостью, за наблюдаемый период в Озёрске и России наблюдалась противоположная динамика общего коэффициента смертности населения (табл. 7). Наиболее значимый рост смертности населения в Озёрске в нарастающем темпе отмечался в 1989 г.: от низкого (до 10 смертей на 1000 населения), среднего после 1989 г. (до 15 смертей на 1000 населения) и высокого уровня смертности после 2010 г. (более 15 смертей на 1000 населения) в 2020 г. В России до 1979 г. уровень смертности был низким, в 1979–1989 – средним, в 2002 – высоким, а затем до 2020 г. – вновь средним [16]. Как следует из табл. 7 уровень младенческой смертности на всем протяжении наблюдения в Озёрске был ниже, чем в России. По шкале младенческой смертности данный показатель в Озёрске в 1959 г. был чрезвычайно высоким (20,1 и выше на 1000 родившихся живыми), до 1989 г. – средним

(10,1–15,0), а после 2002 г. – низким (5,0–10,0). В России младенческая смертность до 2002 г. была выше, а затем до 2020 г. – стала ниже. В целом на 2020 г. младенческая смертность в Озёрске соответствовала 79-му месту, а в России – 48-му месту в мире [17]. На фоне негативных демографических процессов в Озёрске и России за последние годы наблюдаются позитивные тенденции и, в частности, снижение младенческой смертности. Как известно, смертность населения представляет собой один из основных факторов процесса воспроизводства населения в мире. До начала XX века смертность была определяющим фактором, от которого зависела численность населения. В настоящее время во всех экономически развитых странах смертность стабилизировалась на сравнительно низком уровне, в результате чего её роль в воспроизводстве населения существенно снизилась. В России, начиная с 1970-х годов (так же, как и в Озёрске) в результате изменения жизненных установок и системы ценностей, снижения рождаемости и старения населения, а также других причин наблюдается постоянный рост смертности. Так, общий коэффициент смертности за 1970–2005 гг. увеличился в России почти в 2 раза (с 7,9 до 15,1), а в Озёрске – в 3 раза (с 4,7 до 13,0). Особенно быстро росла смертность в 1990-е гг. С 1992 г. в России и с 1993 г. в Озёрске появилась проблема превышения абсолютной и относительной численности умерших над численностью родившихся, что означает естественную убыль населения – депопуляцию.

В современной России и Озёрске общие коэффициенты смертности гораздо выше, чем в других развитых странах. Рождаемость в России и Озёрске по абсолютной величине практически не отличаются от показателей рождаемости в большинстве стран мира. А вот смертность населения до 2005 г. являлась одной из самых высоких в мире. Лишь с 2006 г. в России наметилась небольшая тенденция к снижению ОКС до 12,5 в 2010 г. При этом, несмотря на некоторое повышение ОКР, наблюдающееся в последние годы, естественный прирост населения остается отрицательным, достигая -9,5 в Озёрске и -4,8 в России в 2020 г. Такое снижение естественного прироста, очевидно, было обусловлено дополнительной смертностью от

Таблица 7

Динамика общего коэффициента смертности (ОКС) и коэффициента младенческой смертности (КМС) в Озёрске и России за годы переписи населения

Годы	Озёрск		Россия [16]	
	ОКС	КМС	ОКС	КМС
1959	3,5	25,3	7,4	36,8
1970	4,1	13,9	8,6	23,2
1979	5,6	13,8	10,7	22,0
1989	8,2	16,9	11,2	18,0
2002	12,1	8,8	15,4	13,3
2010	13,8	8,3	14,2	7,5
2020	16,3	6,6	14,6	4,5

коронавирусной инфекции [16]. В условиях снижения рождаемости и следующего за этим постарения населения рост общей смертности является неизбежным объективным процессом. Резкое падение уровня жизни населения в 1990-х гг. определило ухудшение состояния здоровья, рост заболеваемости и смертности.

При этом в России демографический

"крест", когда кривые рождаемости и смертности пересеклись и поменялись местами, наступил в 1992 г. [18], а в Озёрске – в 1993 г. (рис. 1). С 2012 по 2016 гг. наблюдалось сближение этих кривых, но в Озёрске ОКС по-прежнему оставались более высокими, чем ОКР, а в России в тот же период ОКР стал незначительно выше, чем ОКС, однако в 2017 г., как видно из рис. 2,

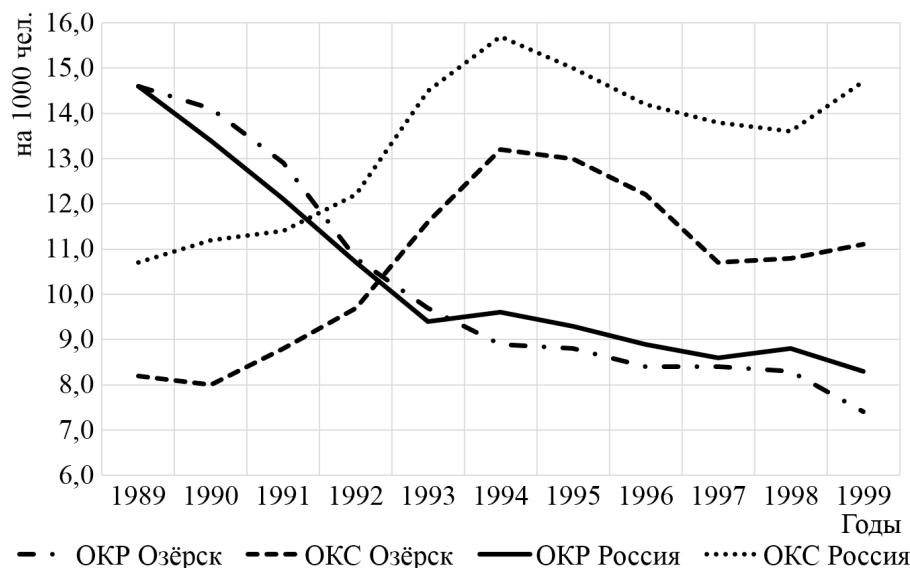


Рис. 1. Динамика общих коэффициентов рождаемости и смертности населения в Озёрске и России с 1989 по 1999 гг. (1-й демографический "крест")

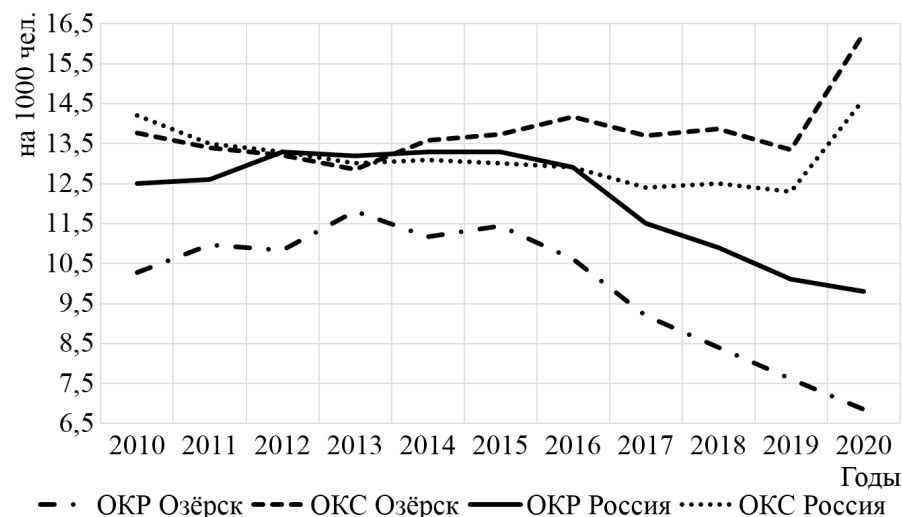


Рис. 2. Динамика общих коэффициентов рождаемости и смертности населения в Озёрске и России с 2010 по 2020 гг. (2-й демографический "крест" в России в 2017 г.)

ОКС в России снова превзошел ОКР (2-й демографический "крест!") [16].

Динамика ОКС различалась не только во всем населении Озёрска и России, но и в разных возрастных группах (табл. 8). При этом во всех возрастных группах Озёрска ОКС в основном повышался, а в России – снижался. Разнонаправленная динамика показателей рождаемости (снижение) и смертности (повышение) с 1992-1993 гг. привела к естественной убыли населения в Озёрске, практически достигшей в 2002–2010 гг. уровня России, то есть к депопуляции. Если естественная убыль населения до 2000 г. компенсировалась миграционным приростом, то в дальнейшем миграционный процесс был не в состоянии восполнить суммарное снижение численности населения Озёрска. За пятилетний период убыль населения составляла в среднем 240 чел. в год. К сожалению, этот процесс будет продолжаться и в дальнейшем.

Основное значение показателей миграции заключается в том, что они являются одной из составляющих процесса изменения численности населения наряду с рождаемостью и смертностью. Анализ динамики миграционных процессов в Озёрске и России показал, что с

1990 по 2020 гг. наблюдалось последовательное снижение интенсивности миграционных процессов (табл. 9). При этом эффективность миграции в России была выше, чем в Озёрске в 2 раза, о чём свидетельствуют средние коэффициенты эффективности миграции за 1990–2020 гг. Таким образом, завершая анализ динамики миграционных процессов в Озёрске, следует отметить, что их исходное состояние по сравнению с Россией в течение наблюдаемого периода было более благоприятным до 2005 г., а затем ухудшилось.

В табл. 10 представлена динамика коэффициентов естественного прироста, коэффициентов и индексов естественной депопуляции населения в Озёрске и России. Из этой таблицы следует, что за наблюдаемый период данные показатели изменились в неблагоприятную сторону в несколько раз, особенно в Озёрске. Средние значения коэффициентов естественной депопуляции и их разброс в Озёрске были больше, чем в России, что является отражением меньшей популяционной устойчивости малых городов. Динамика коэффициентов естественной депопуляции к 2010–2020 гг. в Озёрске оказалась более неблагоприятной, чем в России. При этом коэффициент естественной депопу-

Таблица 8

Динамика общих коэффициентов смертности населения Озёрска и России в младенческом (0 лет), детском (1–14 лет), трудоспособном (15–59 лет) и пожилом возрасте (60+ лет) на 1000 чел.

Возрастные группы, лет	Годы				
	2000	2005	2010	2015	2020
Озёрск					
0	4,4	10,5	8,1	4,5	6,6
1–14	0,1	0,1	0,2	0,4	0,4
15–59	5,5	5,5	5,9	4,7	5,0
60+	45,3	45,1	46,9	57,0	52,7
Все	12,0	12,1	13,7	15,8	16,1
Россия					
0	15,3	11,0	7,5	6,5	4,5
1–14	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
15–59	8,2	8,7	6,5	5,3	5,1
60+	87,4	89,2	77,9	68,3	74,6
Все	15,4	16,1	14,2	13,0	14,6

Таблица 9

Динамика коэффициентов миграции в Озёрске и России (на 1000 чел.)

Годы	Коэффициенты прибытия	Коэффициенты выбытия	Коэффициенты миграционного прироста	Коэффициенты эффективности миграции, %
Озёрск				
1990	24,0	16,8	7,2	17,7
1995	18,2	10,9	7,2	24,9
2000	5,7	7,0	-1,3	-10,4
2005	8,8	7,4	1,4	8,4
2010	3,9	6,7	-2,8	-26,6
2015	20,1	23,8	-3,7	-8,4
2020	24,5	20,1	4,4	9,9
В среднем	15,0	13,2	1,8	2,2
Россия				
1990	28,4	25,8	2,6	4,8
1995	26,9	22,9	4,0	8,2
2000	18,1	16,5	1,6	4,8
2005	14,5	13,8	0,7	2,6
2010	14,7	13,6	1,1	3,9
2015	32,4	30,7	1,7	2,7
2020	28,1	27,4	0,7	1,3
В среднем	23,3	21,5	1,8	4,0

Таблица 10

Динамика коэффициентов естественного прироста (КЕП), коэффициентов естественной депопуляции (КЕД) и индексов естественной депопуляции (ИЕД) населения в Озёрске и России (на 1000 чел.)

Годы переписи населения	Озёрск			Россия		
	КЕП	КЕД	ИЕД	КЕП	КЕД	ИЕД
1959	30,8	0,10	1,00	13,0	0,36	1,00
1970	16,1	0,20	2,00	6,2	0,58	1,61
1979	13,3	0,30	1,50	5,2	0,67	1,16
1989	5,3	0,61	2,03	1,5	0,88	1,31
2002	-3,9	1,48	2,43	-7,1	1,86	2,11
2010	-3,5	1,34	0,91	-1,7	1,14	0,61
2020	-9,5	2,40	1,79	-4,8	1,49	1,31
В среднем	6,94	0,92	1,58	1,76	1,00	1,22
Кратность изменения: 2020 vs 1959	-4,2 раза	24 раза	1,8 раза	-3,7 раза	4,1 раза	1,3 раза

ляции в Озёрске, за исключением небольшого снижения в 2010 г., неуклонно повышался. В отличие от Озёрска в России повышение коэффициента естественной депопуляции наблюдалось до 2002 г., а затем было ниже, особенно, в 2010 г.

Сравнительный анализ динамики коэффициентов общего прироста, коэффициентов и индексов общей депопуляции в Озёрске и России в 1990–2020 гг. обнаружил те же тенденции, что и показатели естественного прироста и депопуляции (табл. 11). На это прежде всего указывают более высокие значения, в том числе средние, и большая кратность неблагоприятных изменений данных показателей у населения Озёрска относительно населения России в большинстве случаев.

Следовательно, полученные результаты свидетельствуют о меньшей популяционной устойчивости населения Озёрска по сравнению с населением России. На это прежде всего указывают более высокие значения средних значений и кратности изменений коэффициентов и индексов естественной и общей депопуляции. При этом значения индексов общей депопуляции в Озёрске и России были сравнительно меньше, чем индексы естественной депопуляции, что указывает на положительную роль миграционного прироста.

Следует отметить, что полученные ре-

зультаты являются следствием особенностей российской модели воспроизводства населения [19–21]. Демографический переход (от высокой к низкой рождаемости и смертности) в России начался позже, чем в Европейских странах. Примерно за 100 лет к 1960-м гг. демографический переход на большинстве российских территорий был завершен. В настоящее время выделяют три основные особенности демографического перехода в России. Первая особенность – это высокая скорость изменения модели воспроизводства. Исходное, до демографического перехода, состояние воспроизводства характеризовалось очень высоким уровнем смертности, прежде всего детской (треть родившихся умирала, не дожив до года), а до 15-летнего возраста не доживало более половины детей. Ожидаемая продолжительность жизни составляла 29 лет для мужчин и 31 год для женщин. Кроме того, было характерно очень раннее вступление в брак, более половины их заключалось в возрасте до 20 лет. В начале XX века, каждым 100 россиянкам необходимо было родить 530 детей, чтобы обеспечить простое замещение поколения, тогда как спустя всего 50 лет – не более 213. Вторая особенность – слабая выраженность демографического взрыва в России в результате одновременного снижения рождаемости и смертности. При демографическом взрыве в Европе снижение

Таблица 11

Динамика коэффициентов общего прироста (КОП), коэффициентов общей депопуляции (КОД) и индекса общей депопуляции (ИОД) в Озёрске и России (на 1000 чел.)

Годы	Озёрск			Россия		
	КОП	КОД	ИОД	КОП	КОД	ИОД
1990	12,4	0,67	1,00	4,8	0,89	1,00
1995	3,9	0,85	1,27	-1,6	1,05	1,18
2000	-4,5	1,38	1,62	-5,0	1,18	1,12
2005	-2,6	1,11	0,80	-5,2	1,21	1,03
2010	-6,6	1,45	1,31	-0,6	1,02	0,84
2015	-6,0	1,19	0,82	2,0	0,96	0,94
2020	-5,1	1,16	0,97	-4,1	1,11	1,16
В среднем	-1,2	1,12	1,13	-1,4	1,06	1,05
Кратность изменения: 2020 vs 1959	-3,4 раза	1,7 раза	1,0 раза	-2,2 раза	1,3 раза	1,2 раза

смертности определённое время происходило на фоне высокой рождаемости, что приводило к увеличению численности населения. Падение рождаемости было следствием быстрой урбанизации. В начале века доля городского населения в России составляла 12 %, а в конце 1960-х гг. достигла 70 %. Одновременно свои плоды дала эпидемиологическая борьба, вакцинация детей, распространение медицинского обслуживания и т. д. Третья особенность – политические, социальные и военные катаклизмы XX века лишили Россию демографического выигрыша, который принёс большинству стран полноценный демографический переход. Отмеченные катаклизмы просто "поглотили" человеческие ресурсы. В результате, когда страна вышла из полосы катастроф, потенциал демографического роста был уже практически исчерпан. Ещё по оценкам Д.И. Менделеева по данным переписи 1897 г. население России при тех социально-экономических условиях развития страны могло достигнуть к 2000 г. около 600 млн чел. [22]. По мнению современных специалистов этот сценарий демографического развития России вряд ли бы осуществился, однако несомненно то обстоятельство, что пережитые Россией катаклизмы не позволили ей пройти полноценные демографические переходы и эпидемиологические революции. Об этом свидетельствует монотонная, а порой регрессивная динамика демографических показателей на протяжении длительного времени [23]. Тем не менее, в настоящее время Россия находится на той же стадии демографического развития, что и большинство развитых стран и основной моделью служит суженное воспроизводства населения на фоне его сильного постарения. При этом в Европе в отличие от России старение является прогрессивным, а популяционная устойчивость – высокой. Рост численности населения страны в основном возможен лишь за счёт миграционного прироста.

Стабилизация процессов воспроизводства населения не означает консервации установившейся модели. В настоящее время многие специалисты отмечают формирование второго демографического перехода, который отчётливо обозначился в наиболее развитых странах, признаки которого видны и в России. Второй демографический переход связан с фундамен-

тальными изменениями в жизненном цикле поколений, изменением системы ценностей людей, их представлений о наиболее приемлемом возрасте вступления в брак и семейных отношений. Так, за последние 30 лет средний возраст матерей при рождении детей увеличился с 25 до 29 лет. Развитию этих процессов способствует вторая эпидемиологическая революция, которая, в отличие от первой эпидемиологической революции, препятствует не только инфекционным заболеваниям, но и многим социально-значимым болезням, ещё недавно считавшимся неизлечимыми: сердечно-сосудистым, злокачественным новообразованиям, сахарному диабету и другим [24]. Однако в нашей стране вторая эпидемиологическая революция только начинается [25, 26]. Об этом свидетельствуют данные о высокой смертности, монотонной динамике общей и возрастной продолжительности жизни, жизненного потенциала и его потерь, а также о рецессивном характере старения населения и отсутствии в населении России так называемых "молодых стариков" по сравнению с развитыми странами [27–30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные результаты подтверждают тезис о том, что демографические процессы в малых городах, в том числе в ЗАТО, имеют относительно меньшие демографические ресурсы. Последнее, очевидно, связано с наличием в малых городах единичных градообразующих предприятий, ухудшение деятельности которых приводит к неблагоприятным социально-экономическим и к соответствующим демографическим изменениям. Подводя итоги сравнительного анализа воспроизводства населения в Озёрске, следует отметить, что его исходное состояние в наблюдаемый период времени было более благоприятным по сравнению с Россией в целом. Однако вследствие более высоких темпов снижения рождаемости и увеличения смертности на фоне недостаточного миграционного прироста, отмеченных при оценке различных показателей демографических процессов, к 2002 г. показатели воспроизводства населения в Озёрске приблизились или стали такими же, как в России. В последние 20 лет динамика этих

показателей, в том числе популяционной устойчивости, в Озёрске стала более неблагоприятной по сравнению с Россией. Наблюдаемые неблагоприятные процессы воспроизводства населения Озёрска и России являются отражением ряда особенностей демографических переходов и второй эпидемиологической революции, обусловленных социальными, политическими и военными катаклизмами XX века в нашей стране. В Озёрске эти процессы явились следствием ещё и меньших демографических ресурсов малого моногорода с основным градообразующим предприятием. Очевидно, что для контроля демографической ситуации необходим регулярный демографический мониторинг населения Озёрска с информированием общественности и администрации города.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента Российской Федерации от 9 октября 2007 г. № 1351 "Об утверждении Концепции демографической политики Российской Федерации на период до 2025 года".
2. Тельнов В.И., Третьяков Ф.Д. Динамика демографических процессов в городе атомной промышленности Озёрске / Демографические перспективы России: материалы международной научно-практической конференции "Демографическое будущее России: проблемы и пути решения". – М.: Academia, 2008. – С. 343–348.
3. Гуськова А.К. Атомная отрасль страны глазами врача. – М.: Реальное время, 2004. – 240 с.
4. Техногенное облучение и безопасность человека / Под общ. ред. акад. РАМН Л.А. Ильина. – М.: ИздАТ, 2006. – 304 с.
5. 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 Physics. – 2008. – V. 94. – No. 5. – P. 449–458.
6. Мартиненко И.А., Сокольников М.Э., Кошурникова Н.А. и др. Оценка риска заболевания раком щитовидной железы у населения при проживании вблизи ПО "Маяк" // Мед. радиология и радиац. безопасность. – 2016. – Т. 61. – № 4. – С. 52–58.
7. Tel'nov V.I., Vologodskaya I.A., Kabasheva N.Ya. Assessment of the effects of a complex of factors on the immunity status of the participants in the liquidation of the Chernobyl power plant accident aftereffects // Мед. радиология и радиац. безопасность. – 1993. – Т. 38. – № 2. – С. 8–12.
8. Кильдишев Г.С., Козлова С.С., Ананьева С.П. и др. Статистика населения с основами демографии: Учебник. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 312 с.
9. Антонов А.И., Борисов В.А. Лекции по демографии: Учебник для вузов. – М.: Академический Проект; Альма Матер, 2011. – 592 с.
10. Бойко А.И., Брусникина С.Н., Егорова Е.А. и др. Демографическая статистика: учебник. – М.: ООО "Изд-во "КНОРУС", 2010. – 480 с.
11. Тельнов В.И. Динамика численности и возрастно-половой структуры населения Озёрска // Материалы XXII всероссийской научно-практической конференции "Дни науки ОТИ НИЯУ МИФИ – 2022". г. Озёрск, 20–23 апреля 2022. – Озёрск, 2022. – С. 105–109.
12. Демография: Учебное пособие / Под ред. В.Г. Глушковой. – М.: КНОРУС, 2004. – 304 с.
13. Борисов В.А. Демография. – М.: Издательский дом "NOTA BENE", 2001. – 272 с.
14. Усачев З. Статистические источники информации о миграции населения России. [Электронный ресурс]: <https://pandia.ru/text/78/297/26908-3.php#:~:text=>
15. Щербакова Е.М. В первом полугодии число родившихся продолжало расти, увеличившись на 1,7 % по сравнению с тем же периодом 2013 года. [Электронный ресурс]: Де-москоп Weekly. <http://www.demoscope.ru/weekly/2014/0609/barom03.php>
16. Демографический ежегодник России. 2021: Стат. сб. / Росстат. – М., 2021. – 256 с.
17. Рейтинг стран мира по уровню младенческой смертности. [Электронный ресурс]: Гуманитарный портал / Child Mortality Report. <https://gtmarket.ru/ratings/child-mortality-ranking>
18. Захаров С. Русский крест. [Электронный ресурс]: Демоскоп Weekly. <http://www.demoscope.ru/weekly/2004/0167/analit07.php>
19. Демографическая модернизация России, 1900–2000 / Под ред. А.Г. Вишневого. – М.: Новое издательство, 2008. – 608 с.
20. Доклад о развитии человеческого потенциала в Российской Федерации. 2008. Россия перед лицом демографических вызовов. – М.:

- Представительство ООН в РФ, 2009. – 208 с.
21. Рыбаковский Л.Л. 20 лет депопуляции в России. – М.: Экон-информ, 2014. – 231 с.
 22. Менделеев Д.И. К познанию России. – 6-е изд. – СПб.: Издание А.С. Суворина, 1907. – 158 с.
 23. Тельнов В.И. Индекс жизненного баланса как показатель старения населения / Материалы XV Международного форума "Старшее поколение" // Успехи геронтологии. – 2022. – Т. 35. – № 4. – С. 640–641.
 24. Omran A.R. The epidemiologic transition. A theory of the epidemiology of population change // *Milbank Mem Fund Q.* – 1971. – V. 49. – No. 4. – P. 509–538.
 25. Постановление правительства Российской Федерации от 26 декабря 2017 г. № 1640 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации "Развитие здравоохранения"".
 26. Улумбекова Г.Э. Здравоохранение России. Что надо делать. – 2-е изд. – М.: ГЭОТАР-Медия, 2015. – 704 с.
 27. Тельнов В.И. Особенности демографического старения населения моногорода атомной промышленности Озёрска // Муниципальные образования регионов России: проблемы исследования, развития и управления: материалы V всероссийской межведомственной научно-практической конференции с международным участием (г. Воронеж, 10–12 ноября 2022 г.) / Под общ. ред. Р.Е. Рогозиной. – Воронеж: Изд-во "Цифровая полиграфия", 2022. – С. 151–155.
 28. Тельнов В.И. Особенности возрастной и календарной динамики демографического старения населения России // IV всероссийский демографический форум с международным участием: сборник материалов (Москва, 2–3 декабря 2022 г.) / Отв. ред. Т. К. Ростовская. – М.: ФНИСЦ РАН, 2022. – С. 56–57.
 29. Тельнов В.И. Сравнительная характеристика динамики жизненного потенциала населения России и Франции за 1959–2020 годы переписи // Демографические факторы адаптации населения к глобальным социально-экономическим вызовам. Сб. науч. ст. – Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2023. – С. 560–570.
 30. Тельнов В.И. Оценка потерь жизненного потенциала у работников ПО "Маяк", населения г. Озёрска и России при основных причинах смерти // Материалы XXIII всероссийской научно-практической конференции "Дни науки ОТИ НИЯУ МИФИ – 2023", посвящённой 120-летию юбилею И.В. Курчатова и 75-летию юбилею ФГУП "ПО "Маяк", Озёрск, 19–21 апреля 2023 г. – С. 60–64.

УДК 546.798.22:539.1.074.9:66–911.38

© 2023

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУБМИКРОННЫХ АЭРОЗОЛЕЙ ^{239}Pu

С.А. Сыпко, В.Э. Введенский, Г.Н. Бобов

Россия, г. Озёрск, ФГБУН Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России

Приведены материалы и методы, применяемые для анализа физико-химических свойств субмикронных промышленных аэрозолей. Представленные подходы могут быть использованы в исследовательских центрах и на предприятиях для изучения физико-химических свойств субмикронных и нанометровых аэрозолей, в том числе в подразделениях Росатома. Экспериментальные исследования дисперсности промышленных α -излучающих субмикронных аэрозолей в воздухе рабочих помещений ПО "Маяк" были проведены для ^{239}Pu с использованием нейтронно-индуцированного метода измерения. Показано, что распределение размеров наночастиц $^{239}\text{PuO}_2$ воздуха отделения оксалатного осаждения имеет распределение Парето. Полученный результат можно использовать как априорное распределение по размерам наночастиц при расчёте дозовой нагрузки от внутреннего облучения от ^{239}Pu на персонал отделения оксалатного осаждения завода РТ ПО "Маяк" при расчёте байесовским методом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПЛУТОНИЙ, АЭРОЗОЛИ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ДИФфуЗИОННАЯ БАТАРЕЯ, НЕЙТРОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ МЕТОД

Развитие атомной энергетики и промышленности приводит к накоплению долгоживущих α -излучающих актинидов (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am), представляющих значительную опасность для здоровья человека. Характерной особенностью α -распада является возникновение ядер отдачи, взаимодействие которых с атомами кристаллической решётки твёрдой фазы радиоактивного вещества приводит к образованию свободных кластеров (субмикронных аэрозолей). Исследования дисперсного состава промышленных α -излучающих аэрозолей воздуха рабочих помещений плутониевого завода, проведённые в середине 1960-х гг., показали наличие мелкодисперсной фракции радиоактивных аэрозолей. Литературные данные свидетельствуют о существовании фракции субмикронных радиоактивных аэрозолей в воздухе рабочих зон предприятий ядерного топливного цикла. Известно, что наночастицы при их поступлении в организм могут отрицательно влиять на здоровье человека. Ни в России, ни за рубежом исследований радиационной опасности, а также влияния наночастиц α -излучающих актинидов на здоровье человека

не проводилось. Практически полностью отсутствуют научные данные о метаболизме и степени радиационной опасности актинидов, поступающих в организм человека в виде субмикронных аэрозолей. Учитывая сказанное выше, актуальность и новизна исследований в области радиационной опасности для здоровья человека субмикронных аэрозолей актинидов не вызывают сомнений.

Аэрозольный поток является сложной многокомпонентной системой. Мы постоянно окружены тысячами мельчайших частиц, и их значение для жизнедеятельности нашей планеты (и нас с вами) огромно. Принимая во внимание такое большое значение аэрозолей, можно подумать, что они постоянно привлекали внимание учёных и что в настоящее время установлены фундаментальные законы поведения аэрозольных частиц. Однако это не так. Наука об аэрозолях – это нелюбимая падчерица физики или, может быть, физической химии и только в настоящее время начинает "расцветать" и возбуждать к себе заслуженный интерес [1].

Согласно рекомендациям рабочей груп-

пы МКРЗ 66 предлагается при использовании моделей дыхательного тракта характеризовать размеры вдыхаемых аэрозольных частиц аэродинамическим диаметром (АМАД), равным 5 мкм [2, 3]. Задержка α -активных аэрозолей актинидов в организме увеличивается по мере уменьшения размеров частиц. По данным [3], снижение размеров аэрозолей плутония обоих классов транспортабельности (умеренно и трудно растворимых) от АМАД \approx 5 мкм до АМАД \approx 0,001 мкм увеличивает значение эффективной дозы внутреннего облучения в 3,5–5 раз. В этой же работе показано, что на радиохимических и плутониевых заводах ядерного топливного цикла размеры аэрозольных частиц могут варьировать в широких пределах, характеризуемых рамками $0,3 < \text{АМАД} < 8$ мкм. Обращает внимание производство ^{238}Pu , на участках которого (система боксов по переработке диоксида) выявлены аэрозоли с АМАД=0,16 мкм при стандартном геометрическом отклонении $\sigma = 2,8$. Последнее свидетельствует о возможности существования на плутониевом производстве аэрозолей со значительным вкладом в ингалируемую α -активность частиц субмикронных размеров: 0,001–0,7 мкм [3], что указывает на актуальность исследований поведения этой фракции аэрозолей как для радиобиологии, так и для дозиметрии актинидов.

Следовательно, возникает необходимость создания методологии проведения рутинных биофизических исследований по определению уровней накопления и доз облучения персонала радиохимической промышленности от α -излучающих аэрозолей, учитывающей распределение размеров субмикронных α -излучающих аэрозолей. Это связано с тем, что растворимость аэрозолей зависит от их размера. Собственные исследования кинетики диализа промышленных α -излучающих субмикронных аэрозолей показали, что в кинетике диализа, характеризующейся двумя фракциями, доля быстрой фракции составляла значения, которые менялись в пределах от 23 до 36 %. Доля быстрой фракции кинетики диализа субмикронных аэрозолей более чем на порядок величины превышала значения, характерные для аэрозолей микронного диапазона. Значения констант скорости убывания быстрой

фракции кинетики диализа α -излучающих субмикронных аэрозолей закономерно менялись в пределах от $0,97 \text{ сут}^{-1}$ до $8,8 \text{ сут}^{-1}$. Показано, что характер кинетики диализа промышленных нанометровых аэрозолей качественно отличается от кинетики диализа аэрозолей микронного диапазона. Транспортабельность аэрозолей нанометровой фракции лежала в пределах от 23 до 36 %. Это на порядок величин больше значений, характерных для микронных аэрозолей, отобранных из воздуха того же самого рабочего помещения.

Целью исследований является разработка методов и средств улавливания наночастиц и измерения их характеристик, исследование физико-химических свойств промышленных α -излучающих субмикронных аэрозолей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Механизм действия диффузионных батарей основывается на том, что коэффициент диффузии броуновской частицы обратно пропорционален её размеру. Теория осаждения частиц при прохождении через фильтры была исследована и рассмотрена Yeh (1972) [4], Davies (1973) [5] и Kirsch and Stechkina (1978) [6]. В работе [6] разработана теория фильтрации, связывающая характеристики проницаемости диффузионной батареи с параметрами сетки и скоростью потока воздуха. Анализ зависимости проницаемости экрана при одном и том же расходе воздуха показывает, что доля задержанных на одном экране частиц увеличивается по мере снижения размера. При этом увеличение скорости прокачки аэрозоля через экраны приводит к снижению доли частиц, задержанных на нём. Таким образом, меняя число экранов диффузионной батареи, можно добиться сдвига кривой проницаемости по спектру размеров частиц, что позволяет вырезать аэрозоли определённого размера из всего спектра.

Диффузионная батарея представляет собой конструкцию, состоящую из набора фигурных колец (рис. 1). Крестообразное кольцо с фильтром или без него устанавливается первым по ходу отбираемого воздуха. Между фигурными кольцами помещаются улавливающие экраны. Они представляют собой круглые металличе-

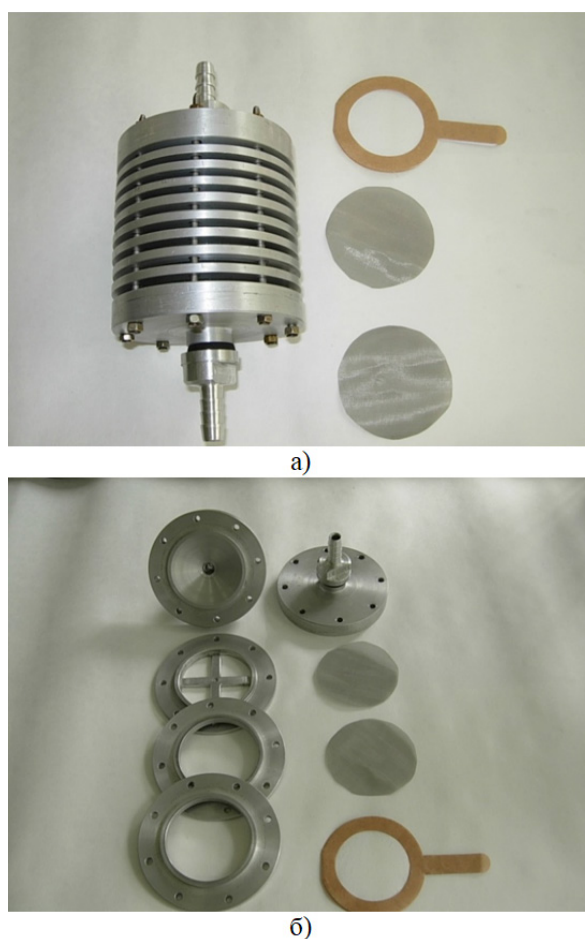


Рис. 1. Диффузионная батарея: а) внешний вид; б) элементы внутренней части батареи

ские сетки, выполненные из нержавеющей стали. Для отбора наночастиц различных размеров использовалось три типа металлических сеток. На последний каскад диффузионной батареи помещается аэрозольный фильтр для улавливания частиц, преодолевших все сетчатые экраны.

Метод переноса наночастиц с поверхности сеток диффузионной батареи на поверхность трекового детектора

Необходимость разработки метода переноса субмикронных аэрозолей с поверхности сеток диффузионной батареи для изучения

размеров нейтронно-индуцированным методом является очевидной, так как необходимо подвергать нейтронному облучению образец наночастиц, находящихся на поверхности трекового детектора. Возможным способом переноса наночастиц с поверхности сеток диффузионной батареи является способ, использующий рабочую жидкость. На первом этапе наночастицы переносятся в рабочую жидкость. Жидкость, которая содержит в себе наночастицы, наносится на поверхность детектора. После испарения жидкости наночастицы остаются на поверхности трекового детектора. Такой образец можно подвергать облучению нейтронами. Также для переноса субмикронных аэрозолей на поверхность трекового детектора можно использовать канцелярскую клейкую ленту.

Выбор метода измерения размера для субмикронных α -активных аэрозолей

Исследования физических и химических свойств субмикронных аэрозолей плутония, а также их метаболизма в организме человека невозможны без разработки соответствующих методов выполнения измерений. Анализ литературных данных показывает, что для исследований свойств наночастиц приемлемыми могут оказаться следующие методы измерения:

- автораддиографический метод;
- метод нейтронно-индуцированной трековой дозиметрии;
- метод электронной микроскопии.

Метод автораддиографии успешно применяется для изучения дисперсного состава промышленных α -излучающих аэрозолей, а также в исследованиях микрораспределения актинидов в органах и тканях подопытных животных и человека [7]. Однако применимость данного метода в исследованиях свойств наночастиц весьма ограничена. Нетрудно оценить число α -распадов ^{239}Pu , составляющих наночастицу размером в 104 атома (максимальный размер фрагментов, образующихся при α -распаде этого радионуклида в микронных частицах) за один год наблюдения. Оно составляет $\approx 0,3$. Иначе говоря, за период в 3 года каждый фрагмент диоксида Pu указанного размера в среднем даст приблизительно один α -распад. Учитывая то, что эффективность регистрации α -распадов

автордиографического метода составляет приблизительно 0,3 [8, 9], можно с уверенностью оценить, что приблизительно за 10 лет наблюдений в среднем будет образовываться один α -трек. Исключение составляют актиниды, имеющие сравнительно короткий период полураспада. К таким α -излучающим радионуклидам относится ^{238}Pu . Неслучайно при исследовании фрагментации диоксида ^{238}Pu был применён рассматриваемый метод выполнения измерений. Однако производственных участков, в воздухе рабочих помещений которых присутствует диоксид ^{238}Pu без примеси ^{239}Pu , крайне мало. В подавляющем большинстве производственных помещений в состав промышленных α -излучающих аэрозолей входит ^{239}Pu . Причём массовая доля этого нуклида значительно преобладает. Таким образом, можно сделать вывод о том, что автордиографический метод неприменим в исследованиях свойств нанометровых промышленных аэрозолей ^{239}Pu .

Учитывая специфику исследований, которая заключается в чрезвычайно малых размерах объекта изучения (а следовательно, крайне низкой его активности), можно сформулировать следующие требования к методам выполнения измерений:

- метод выполнения измерения должен быть неразрушающим, иначе говоря, в процессе подготовки проб наночастиц и последующего измерения сами частицы не должны подвергаться разрушению;

- метод выполнения измерений должен обладать очень высокой чувствительностью.

Оба требования, как отмечалось, вытекают из малых размеров объекта исследований. В связи с этим применение радиометрических методов анализа в исследованиях свойств наночастиц плутония в значительной мере ограничено. Это связано и с тем, что в процессе радиохимического анализа, как правило, проводится так называемое влажное озоление, которое заключается в обработке пробы кислотами до полного растворения радиоактивного вещества. Затем анализируемое радиоактивное вещество тем или иным способом выделяется и подвергается ядерно-физическому анализу (измерение активности). Очевидно, что в таких условиях возможное присутствие в анализируемом образце даже незначительного числа ча-

стиц плутония микронного диапазона способно кардинально (на несколько порядков величины) изменить результат анализа и его последующую трактовку.

Облучение трековых детекторов в поле нейтронов

Сущность метода нейтронно-индуцированной трековой дозиметрии заключается в следующем. Анализируемый образец (в нашем случае это наночастицы) помещают между двумя трековыми детекторами. Полученную сборку подвергают облучению в поле нейтронов. В результате деления ядер ^{239}Pu возникают осколки. В среднем суммарная кинетическая энергия осколков, образующихся при делении ядер ^{235}U и ^{239}Pu , составляет величину, приблизительно равную 203 МэВ. Осколки, взаимодействуя с материалом трекового детектора, оставляют в нём след разрушения. После облучения трековый детектор подвергают специальной обработке для визуализации образовавшихся треков. В качестве материала трековых детекторов использовали синтетическое кварцевое стекло. Синтетическое кварцевое стекло показало наименьший фон из доступных трековых детекторов: поликарбонат (CR-39), лавсан, слюда, стекло, кварц.

Облучение трековых детекторов проводили на водо-водяном исследовательском ядерном реакторе бассейнового типа ИВВ-2М (ИЯР ИВВ-2М) до достижения численного значения флюенса тепловых нейтронов 10^{16} – 10^{18} нейтрон/см². Значение флюенса предварительно согласовывалось.

Краткое описание исследовательского ядерного реактора ИВВ-2М

Водо-водяной исследовательский ядерный реактор бассейнового типа ИВВ-2М (ИЯР ИВВ-2М) был спроектирован и создан на базе отечественного бассейнового реактора ИРТ-2000. Физический пуск реактора был проведён 22 апреля 1966 г. В период 1974–1982 гг. была проведена реконструкция реактора на проектную мощность 20 МВт. В настоящее время реактор эксплуатируется на номинальной мощности 15 МВт.

Активная зона ИЯР ИВВ-2М состоит из тепловыделяющих сборок типа ИВВ-2М, экспериментальных устройств и окружена бериллиевым отражателем. Компонировка активной зоны выбирается в соответствии с конкретной задачей на кампанию на основе типовых или вновь разработанных картограмм. Активная зона и боковой отражатель реактора расположены в бассейне, заполненном химически обессоленной водой, который окружён массивом бетона, выполняющим роль биологической защиты. Вода в бассейне является одновременно теплоносителем активной зоны, замедлителем, торцевым отражателем и биологической защитой в верхнем направлении. Активная зона и боковой отражатель заключены в алюминиевый корпус (обечайку) и размещаются на опорной решётке, которая содержит ячейки (посадочные гнезда) для установки тепловыделяющих сборок и блоков отражателя. Шаг решётки треугольный и равен 64 мм. Полное число ячеек в опорной

решётке под ТВС и блоки отражателя – 186. Количество тепловыделяющих сборок в рабочей загрузке активной зоны может изменяться от 30 до 42.

Облучение подготовленных образцов проводилось в канале АК-1. Канал АК-1 представляет собой "сухой" канал, изготовленный из алюминиевой трубы диаметром 52 мм с толщиной стенки 2 мм. "Сухой" канал АК-1 установлен на пробку активной зоны, и его доньшко находится на уровне 330 мм выше низа активной зоны. Защита от прямого воздействия гамма излучения активной зоны реактора на персонал обеспечивается заданной кривизной канала. Для исключения случайного попадания в канал посторонних предметов канал имеет пробку. Канал АК-1 крепится к площадке СУЗ специальным кронштейном. Схема расположения "сухого" канала АК-1 в опорной решётке активной зоны реактора ИВВ-2М представлена на рис. 2.

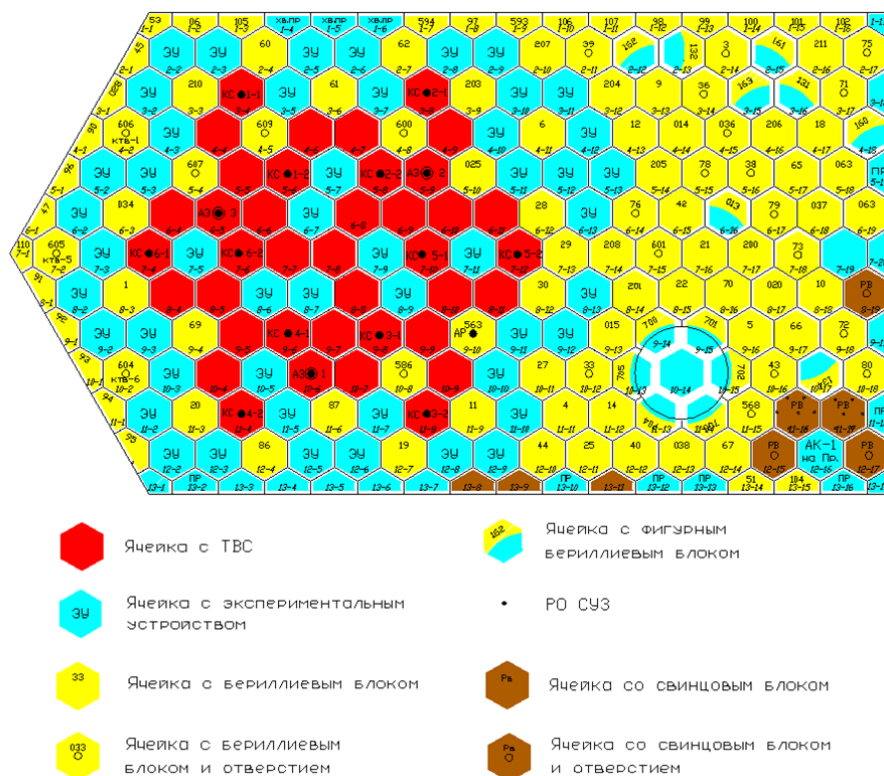


Рис. 2. Компонировка активной зоны реактора ИВВ-2М

Плотность потока нейтронов определена нейтронно-активационным методом с использованием следующих аттестованных детекторов:

- Со и Au-детекторы – для измерения плотности потока тепловых ($E < 0,625$ эВ) нейтронов;
- In-детекторы – для измерения плотности потока быстрых ($E > 1,15$ МэВ) нейтронов.

Пластмассовые контейнеры с трековыми детекторами упаковывались в полиэтиленовую пленку. Упакованные контейнеры помещались в алюминиевый пенал без верхней крышки (диаметр $45 \times 1,5$ мм и длина 200 мм), который на нержавеющей тросике, закреплённом через отверстия в верхней части пенала, загружался в "сухой" канал АК-1. Загрузка пенала с трековыми детекторами в "сухой" канал АК-1 (ячейка 12-16) осуществлялся персоналом группы физики и технологии ИЯР по распоряжению начальника ИЯР. Трековые детекторы облучались в активной зоне реактора в соответствии с РИ-09.74/09 "Исследовательский ядерный реактор. Руководство по эксплуатации". При достижении значения флюенса тепловых нейтронов пенал с трековыми детекторами подтягивался на 3-4 м над активной зоной для распада короткоживущих нуклидов. После выдержки облучённых трековых детекторов в "сухом" канале АК-1 контейнеры с трековыми детекторами передавались ЮУрИБФ в установленном на предприятии порядке.

Метод визуализации треков на облучённом детекторе

Под визуализацией или выявлением треков деления подразумевается любая процедура, которая обеспечивает увеличение первоначальной зоны дефектов, образуемых при взаимодействии осколка деления с материалом трека, до размеров, позволяющих использовать для анализа обычные оптические микроскопы. Наиболее распространённым способом визуализации треков является метод избирательного травления поверхности детектора. По окончании процедуры травления детекторы подвергались промывке в дистиллированной воде и высушивались на фильтровальной бумаге. Протравленные и высушенные детекторы про-

сматривались с помощью оптического микроскопа. Цифровые изображения получались с использованием цифрового фотоаппарата, соединённого с компьютером.

Использование кварцевых стёкол в качестве детекторов осколков деления ядер ^{239}Pu позволяет производить регистрацию осколков с эффективностью 38–60 %. Значение МДА составило 12 мкБк. Из этого следует, что применение кварцевых стёкол в качестве детекторов осколков деления позволяет определять низкие уровни активности плутония – 12 мкБк, что более чем в 80 раз меньше значения МДА (1 мБк) применяемого в настоящее время α -спектрометрического метода измерений.

Разработана методика выполнения измерений ^{239}Pu , содержащегося в промышленных α -излучающих наночастицах [10].

Метод интерпретации визуализированных изображений треков

Терминология: звезда – это группа треков от отдельной наночастицы ^{239}Pu на поверхности трекового детектора, полученных в результате нейтронно-индуцированного метода; простая звезда – это звезда, в которой возможно визуально сосчитать все треки с помощью оптического микроскопа; сложная звезда – это звезда, в которой по каким-либо причинам невозможно визуально сосчитать все треки, например, некоторые треки перекрываются, или область звезды выходит за площадь детектора и т. п.; толстый слой – это термин, который применяется для случая, когда между трековыми детекторами расположена ткань органов человека. Этот термин введён для упрощения повествования. Для случая, когда между трековыми детекторами воздух, специальный термин не вводился.

В ходе исследований, направленных на разработку нейтронно-индуцированного метода измерения размеров наночастиц, проводился анализ изображений визуализированных треков деления, который показал следующее. Треки образуют следующие конфигурации:

- одиночные треки, которые могут являться либо следствием деления ^{235}U , присутствующего в приповерхностном слое материала детектора, либо результатом деления ^{239}Pu , содержащегося в наночастице столь малого

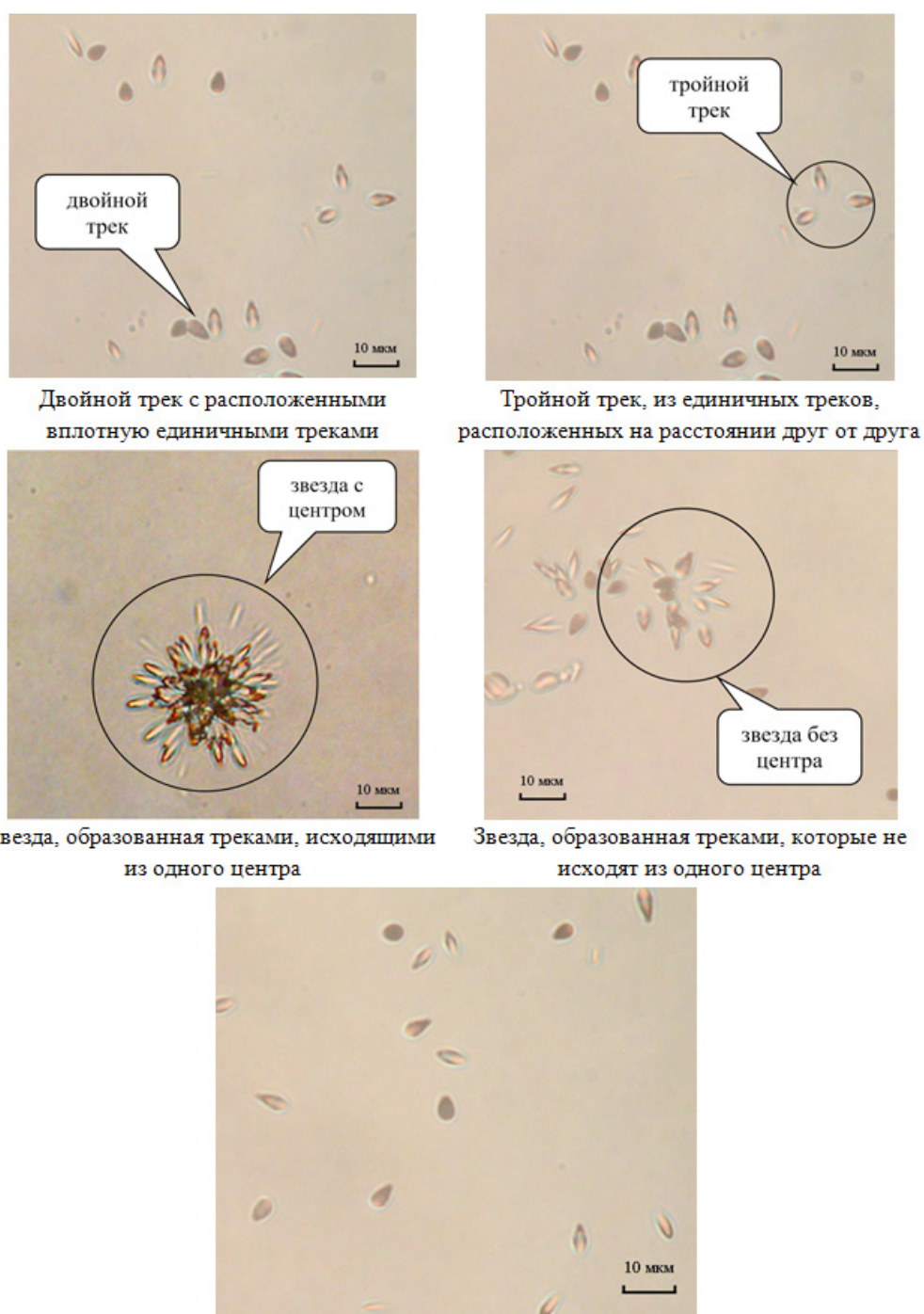


Рис. 3. Взаимное расположение треков. Близо расположенные треки, которые нельзя рассматривать как результат деления ^{239}Pu , в наночастице

размера, что при данном значении флюенса и эффективности регистрации будет зарегистрирован единичный трек;

- двойные треки, расположенные как вплотную, так и на различных расстояниях (рис. 3);

- звёзды, образованные треками, исходящими из одного центра, а также звёзды, центры которых не имели (рис. 3);

- группы близко расположенных треков, которые можно интерпретировать как треки, образованные делением ядер ^{239}Pu , содержащегося в одной или более наночастицах;

- образования близко расположенных треков, которые по геометрическим соображениям нельзя рассматривать в качестве результата деления ядер плутония, расположенных в наночастице (рис. 3).

Таким образом, при решении задачи классификации изображений треков возникло две качественно различавшиеся ситуации. В первой визуализированные треки, в числе которых были парные или тройные треки, начала которых располагались вплотную, а также звёзды, имевшие явный центр, с очевидностью можно было приписывать одной наночастице. Во втором случае этого сделать было нельзя, что приводило к необходимости прибегать к дополнительным рассуждениям и использовать некоторые критерии, выполнение которых позволяло приписывать видимые треки звезде, образованной делением ядер ^{239}Pu , содержащегося в одной наночастице.

В процессе реализации метода измерений размеров наночастиц необходимо провести классификацию изображений визуализированных треков на основе их взаимного расположения. В табл. 1 приведены возможные конфигурации пары близко расположенных треков [11]. Для простоты дальнейшего изложения под линией симметрии подразумевали проекцию траектории прямолинейного движения осколка деления в материале детектора на плоскость его поверхности.

Определение диаметра $^{239}\text{PuO}_2$ [12, 13]

Диаметр частицы рассчитывали в соответствии с формулой [1]:

$$l = k \cdot n \cdot a, \quad (1)$$

где a – шаг кристаллической решётки (0,54 нм для $^{239}\text{PuO}_2$);

k – коэффициент, зависящий от физических характеристик соединения и интерпретации размера частицы [1]. Например, для $^{239}\text{PuO}_2$: диаметр Мартина $k = 1$; диаметр Ферета $k = \sqrt{3}$;

n – число шагов кристаллической решётки.

Число шагов кристаллической решётки вычисляется по формуле:

$$n = \left[\frac{\sqrt[3]{2N - 1} - 1}{2} + 0,5 \right], \quad (2)$$

где N – количество ядер радиоактивного нуклида частицы;

$[]$ – оператор, возвращающий целую часть числа.

Число атомов частицы N , облучённых в поле тепловых нейтронов, рассчитывали на основе подсчёта числа визуализированных треков в соответствии с выражением:

$$N = \frac{N_f}{\varepsilon \Phi \sigma_f 10^{-24}}, \quad (3)$$

где N_f – число треков, приписанных данной частице в процессе обработки изображений;

ε – эффективность регистрации актов деления трековым детектором;

Φ – флюенс тепловых нейтронов, $4,06 \cdot 10^{17}$ нейтрон/см²;

σ_f – сечение деления ядра ^{239}Pu в поле тепловых нейтронов, $750 \pm 1,82$ барн;

10^{-24} – коэффициент перехода от барн к см².

Зависимость диаметра частицы l по Мартину для $^{239}\text{PuO}_2$ от количества треков в простой звезде [14]:

$$l = 5,1941 N_f^{0,3394}. \quad (4)$$

Стандартная неопределённость диаметра частицы l по Мартину для $^{239}\text{PuO}_2$

$$u(l) = 0,09 N_f^{0,3394}. \quad (5)$$

Стандартная неопределённость диаметра частицы l по Мартину для $^{239}\text{PuO}_2$ зависит от количества треков в простой звезде, соответствующих данной частице, и составляет 1,67 % от диаметра частицы l по Мартину. Например, для частицы, у которой 10 треков: $l = 21,7$; $u(l) = 0,4$; 1000 треков: $l = 56,7$; $u(l) = 0,95$.

Формулы, аналогичные (4) и (5), были раз-

Таблица 1

Возможные конфигурации парных треков [11]

№ п/п	Вид конфигурации	Описание
1		Линии симметрии двух треков пересекаются в точке А, положение которой можно легко определить. Углы входа осколков деления в материал детектора не равны $\pi/2$.
2		Треки деления находятся на одной линии симметрии. Осколок № 1 входит в материал детектора под углом, не равным $\pi/2$. Осколок № 2 входит в мишень под углом близким к $\pi/2$. Линии симметрии пересекаются в точке А.
3		Линии симметрии треков совпадают. Осколки входят в материал детектора под углами, не равными $\pi/2$. Точку, из которой осколки вылетели, путём геометрического построения определить не представляется возможным.
4		Треки не находятся на одной оси симметрии. Точки образования треков не совпадают. Осколки входят в материал детектора под углами, не равными $\pi/2$.
5		Через треки нельзя провести общую линию симметрии. Осколок № 1 вошёл в материал детектора под углом, близким к $\pi/2$. Осколок № 2 вошёл в материал детектора под углом, не равным $\pi/2$. Точки образования осколков не совпадают.
6		Через треки можно провести линию симметрии. Оба осколка входят в материал детектора под углами, близкими к $\pi/2$. Точки вылета осколков не совпадают.

работаны и для сложной звезды [13, 15].

Разработаны следующие документы: инструкция "Способ нанесения срезов тканей на трековые детекторы"; инструкция "Подбор биологических тканей профессиональных работников ЯТЦ для исследований микрораспределения промышленных α -излучающих наночастиц"; инструкция "Способ определения количества ядер радиоактивного нуклида частицы, включающий облучение частицы в поле тепловых нейтронов, при воздушной среде между частицей и мишенью"; инструкция

"Способ определения количества ядер радиоактивного нуклида частицы, включающий облучение частицы в поле тепловых нейтронов, при нахождении частицы в биологической ткани".

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования дисперсности промышленных α -излучающих субмикронных аэрозолей в воздухе рабочих помещений ПО "Маяк" были проведены для ^{239}Pu с использованием нейтронно-индуцированного

метода измерения диаметра субмикронных аэрозолей диоксида плутония [14].

В рассмотрение были взяты 36 детекторов, из них 26 детекторов – это пробы субмикронных аэрозолей из отделения оксалатного осаждения, прокалки и получения диоксида плутония из отработавшего ядерного топлива завода РТ "ПО "Маяк" и 10 детекторов фоновых. Построили распределение в виде дзета-распределения Римана. Вероятностное распределение имеет вид:

$$\Pr[X = x] = \frac{1}{\zeta(\rho + 1)} x^{-(\rho + 1)}, \rho > 0, \quad (6)$$

где ζ – дзета-функция Римана:

$$\zeta(s) = \sum_{j=1}^{\infty} j^{-s}, s > 0. \quad (7)$$

Построили дзета-распределение Римана двумя способами [16]: методом максимума правдоподобия (ММП) и методом взвешенных наименьших квадратов (МВНК).

Метод максимума правдоподобия:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \ln(x_i)}{N} = \frac{-\zeta'(\rho + 1)}{\zeta(\rho + 1)}, \rho > 0 \quad (8)$$

где $\hat{\rho}$ – ММП оценка параметра ρ ;

N – общее количество звёзд, включая вырожденные звёзды с одним треком;

x_i – количество треков в i -ой звезде, $i = 1, 2, \dots, N$.

Метод взвешенных наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^N \left(1 - \delta_{x_i, k} \right) \left[10^j \left(\frac{\sum_{i=1}^N \delta_{x_i, j}}{N} - \frac{1}{\zeta(\rho + 1)} j^{-(\rho + 1)} \right)^2 \right] \xrightarrow{\rho} \min, \rho > 0, \quad (9)$$

где $\hat{\rho}$ – МВНК оценка параметра ρ ;

N – общее количество звёзд, включая вырожденные звёзды с одним треком;

$\delta_{x_i, j}$ – Символ Кронекера:

$$\delta_{x_i, j} = \begin{cases} 1, & x_i = j \\ 0, & x_i \neq j \end{cases}$$

Результаты построения приведены в табл. 2, где R^2 – коэффициент детерминации. Сравнивая коэффициент детерминации для метода ММП и метода МВНК, видно, что дзета-распределение Римана, построенное методом МВНК, в общем более точно соответствует

входным данным, поэтому далее будем рассматривать дзета-распределение Римана, построенное методом МВНК.

Дзета-распределение Римана является однопараметрическим, поэтому проанализируем параметр $(\rho + 1)$ по категориям (рис. 4 и 5).

Как видим, фон и сумма сигнал + фон статистически не различимы. Это подтверждает статистический тест: U-тест Манна-Уитни и тест Уолда-Волфовитца.

Ранее было показано, что вероятностное распределение "звёзд" по числу треков от продуктов деления ^{239}Pu является одномерным дискретным дзета-распределением Римана (1)-(2). Данное распределение было использовано по причине того, что областью определения являлись "звёзды", а количество треков в звёздах по природе дискретно: "звезда" с одним треком, "звезда" с двумя треками и т. д. Но дискретность не является свойством самих частиц, а возникает из-за метода измерения. Распределение самих частиц по размерам можно считать непрерывным. Правомомерность этого предположения будет показана ниже по тексту. Можно перейти от одномерного дискретного дзета-распределения Римана "звёзд" на мишенях к непрерывному распределению линейных размеров частиц, соответствующим этим "звёздам", в предположении, что это частицы $^{239}\text{PuO}_2$.

В соответствии с формулами (1)-(2), диаметр частицы является дискретным с шагом 0,54 нм для $^{239}\text{PuO}_2$, но этой дискретностью мы пренебрегаем. Например, зависимость диаметра частицы по Мартину от количества треков в "звезде" N_f для $^{239}\text{PuO}_2$ приведена на рис. 6. Несмотря на то, что метод не "видит" частицы менее 5,4 нм, разрешение метода (увеличение размера частицы с увеличением "звезды" на один трек), начиная с 3 треков на "звезду", – менее 1 нм, а с 30 треков – менее 0,2 нм.

Расширим область определения с дискретной до непрерывной так, чтобы в точках пересечения областей значения совпадали. Для этого перейдём к непрерывному распределению Парето первого рода [17]:

$$P_x(x) = a k^a x^{-(a+1)}, a > 0, k > 0, x \geq k. \quad (10)$$

Математическое ожидание и дисперсия распределения Парето следующие:

Таблица 2

Параметры дзета-распределения Римана

№ пп	Тип	МВНК			ММП		
		$\frac{1}{\zeta(\rho+1)}$	$(\rho+1)$	R^2	$\frac{1}{\zeta(\rho+1)}$	$(\rho+1)$	R^2
1	фон	0,985709	6,242661	0,751071	0,989824	6,712849	0,550449
2	сигнал+фон	0,928128	4,073373	0,936506	0,968358	5,158765	0,627548
3	сигнал+фон	0,999824	12,48066	0,352848	0,999533	11,07914	0,636326
4	сигнал+фон	0,887687	3,50	0,750323	0,971891	5,318498	0,653108
5	сигнал+фон	0,942585	4,366389	0,951318	0,971734	5,310947	0,804383
6	сигнал+фон	0,99011	6,752484	0,818335	0,990645	6,829874	0,799164
7	сигнал+фон	0,890886	3,538378	0,787839	0,974167	5,432795	0,636035
8	фон	0,898137	3,625553	0,93723	0,952164	4,606952	0,387052
9	сигнал+фон	0,974912	5,472497	0,901867	0,990733	6,843042	0,436604
10	сигнал+фон	0,991002	6,8841	0,794216	0,991401	6,947275	0,773538
11	фон	0,999031	10,03617	0,694651	0,998608	9,519176	0,287556
12	сигнал+фон	0,985582	6,230485	0,935582	0,986298	6,300789	0,92386
13	фон	0,998441	9,35765	1	0,998496	9,40881	0,999932
14	фон	0,996765	8,321234	0,994905	0,996827	8,348626	0,995497
15	фон	0,994559	7,588061	0,999486	0,994647	7,610859	0,999645
16	сигнал+фон	0,974754	5,463973	0,899617	0,981999	5,925315	0,78208
17	сигнал+фон	0,84248	3,079842	0,711496	0,953972	4,657999	0,394676
18	сигнал+фон	0,972325	5,339514	0,987241	0,97494	5,474023	0,976239
19	сигнал+фон	0,970509	5,253652	0,999616	0,972293	5,337968	0,99965
20	сигнал+фон	0,955927	4,715581	0,941219	0,974423	5,446336	0,854855
21	сигнал+фон	0,948375	4,506243	0,936558	0,972577	5,351893	0,733417
22	сигнал+фон	0,956223	4,724547	0,950746	0,972758	5,360871	0,833368
23	сигнал+фон	0,986886	6,361296	0,87471	0,987386	6,41509	0,861636
24	сигнал+фон	0,955481	4,702217	0,864552	0,983276	6,026277	0,605194
25	фон	0,787334	2,714419	0,550025	0,950265	4,555488	0,559165
26	фон	0,997299	8,576865	0,994629	0,997266	8,559271	0,99505
27	фон	0,948457	4,508329	0,896294	0,976176	5,542693	0,688379
28	фон	0,994693	7,623099	0,999998	0,995078	7,729031	0,999562
29	сигнал+фон	0,992844	7,203912	0,970445	0,992761	7,187656	0,971669
30	сигнал+фон	0,980005	5,781555	0,982852	0,981432	5,882807	0,972446
31	сигнал+фон	0,989018	6,607055	0,94426	0,989461	6,664172	0,935418
32	сигнал+фон	0,968696	5,173224	0,992692	0,961216	4,885875	0,977606
33	сигнал+фон	0,964313	4,997204	0,985988	0,973159	5,380967	0,946085
34	сигнал+фон	0,900728	3,658311	0,896767	0,959794	4,837805	0,527551
35	сигнал+фон	0,980272	5,799947	0,996201	0,981048	5,854806	0,994455
36	сигнал+фон	0,999943	14,10841	0,363558	0,9998	12,29573	0,665512

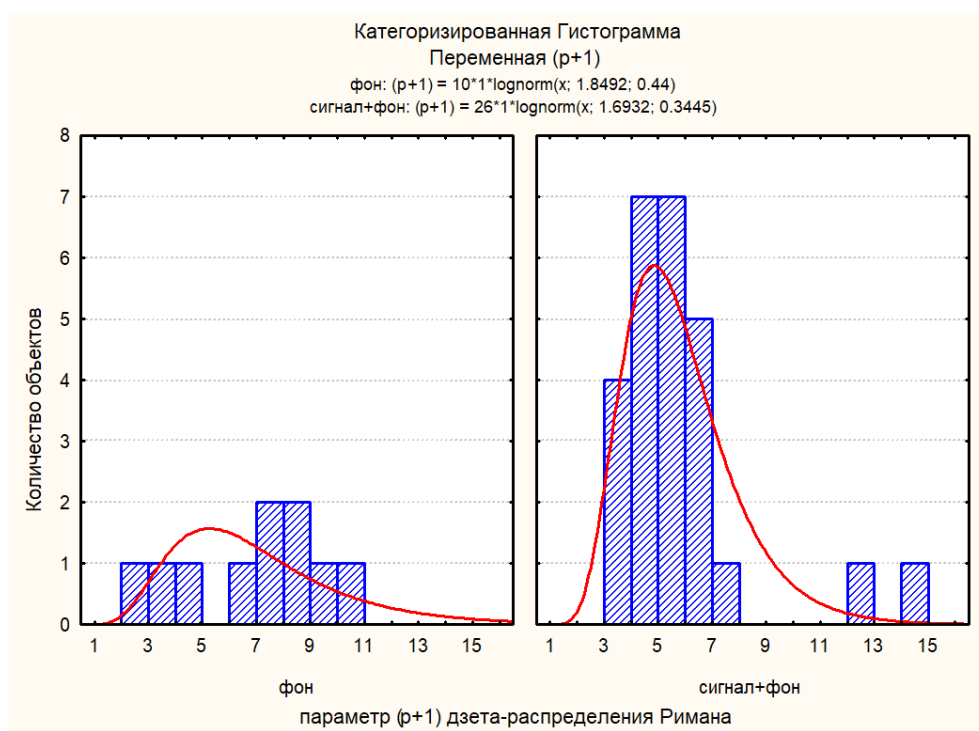


Рис. 4. Распределение параметра $(p + 1)$

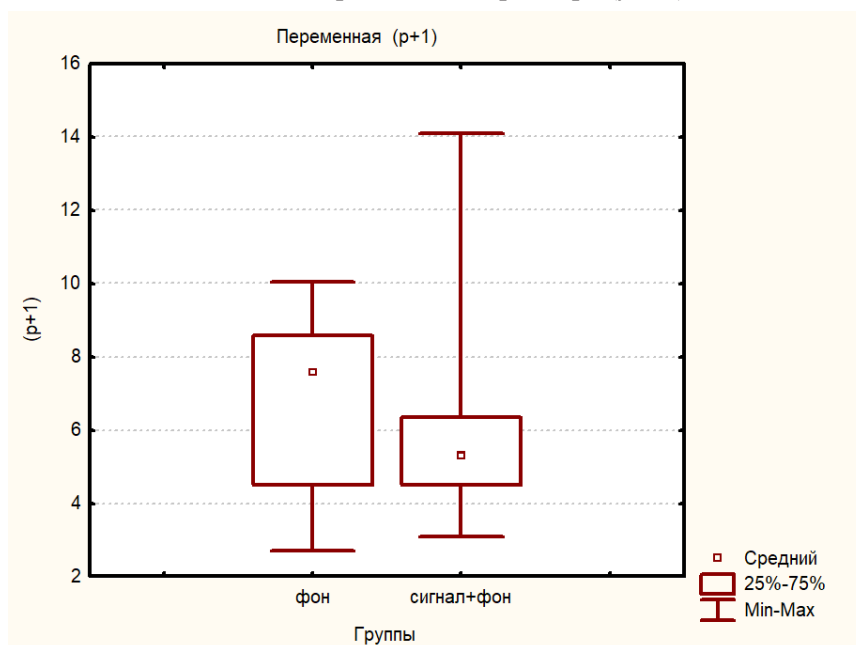


Рис. 5. Диаграмма размаха распределения параметра $(p + 1)$

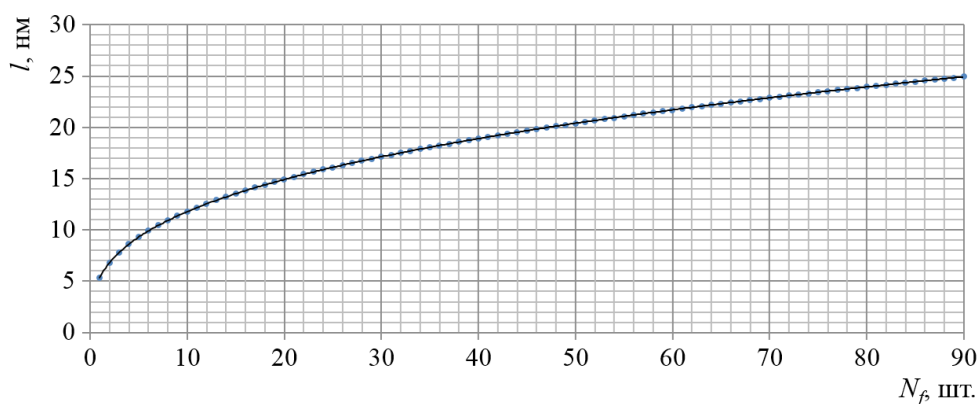


Рис. 6. Зависимость диаметра частицы l по Мартину для $^{239}\text{PuO}_2$ от количества треков в "звезде" N_f

$$\begin{aligned} E[X] &= \frac{ak}{a-1}, a > 1 \\ \text{Var}[X] &= \frac{ak^2}{(a-1)^2(a-2)}, a > 2 \end{aligned} \quad (11)$$

Параметры распределения Парето a и k находим из соотношения:

$$\begin{cases} a \equiv \rho \\ k \equiv \sqrt[\rho]{\frac{1}{\rho \cdot \zeta(\rho+1)}} \end{cases} \quad (12)$$

Зависимость диаметра частицы l по Мартину для $^{239}\text{PuO}_2$ от количества треков в "звезде" (4). В силу того, что суперпозиция степенных функций – есть функция степенная, перейдем от непрерывного распределения Парето количества треков в "звездах" к распределению Парето частиц по диаметрам:

$$P_L(l) = a'k'^{a'}l^{-(a'+1)}, a' > 0, k' > 0, l \geq k', \quad (13)$$

где параметры распределения Парето a', k' можно найти, решая систему уравнений:

$$\begin{cases} l = 5,1941x^{0,3394} \\ a'k'^{a'}l^{-(a'+1)} = ak^ax^{-(a+1)} \\ a > 0, k > 0, x \geq k, a' > 0, k' > 0, l \geq k' \end{cases} \quad (14)$$

Например, в табл. 1 мишень под номером 4 (колонка МВНК): $(\rho + 1) = 3,50$. Используя (12), получаем:

$$\begin{cases} a = 2,50 \\ k = 0,66 \end{cases} \quad (15)$$

Решая систему уравнений (13) с помощью надстройки Microsoft® Excel® "поиск решения", получаем:

$$\begin{cases} a' = 9,31 \\ k' = 4,81 \end{cases} \quad (16)$$

Математическое ожидание и дисперсию диаметра частицы по Мартину четвертой мишени вычисляем по формуле (11):

$$\begin{aligned} E[l] &= 5,4 \text{ нм}, \\ \text{Var}[l] &= 0,4 \text{ нм}^2. \end{aligned} \quad (17)$$

В настоящее время в лаборатории проводятся исследования микрораспределения ^{239}Pu в лёгких [18], печени и скелете работников ПО "Маяк", а также жителей из Озёрска, Тобольска, Воронежа, никогда не работавших с делящимися материалами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены материалы и методы, применяемые для анализа физико-химических свойств субмикронных промышленных аэрозолей [19]. Представленные подходы могут быть использованы в исследовательских центрах и на предприятиях для изучения физико-химических свойств субмикронных и нанометровых аэрозолей, в том числе в подразделениях Росатома.

Экспериментальные исследования дисперсности промышленных α -излучающих субмикронных аэрозолей в воздухе рабочих помещений ПО "Маяк" были проведены для ^{239}Pu с использованием нейтронно-индуциро-

ванного метода измерения. Показано наличие субмикронных частиц $^{239}\text{PuO}_2$ в пробах аэрозолей отделения оксидного осаждения завода регенерации топлива ПО "Маяк". Показано, что распределение размеров наночастиц $^{239}\text{PuO}_2$ имеет распределение Парето. Полученный результат качественно коррелирует с данными, опубликованными Р. Флейшером и О. Раабе в аналогичном эксперименте [20]. Полученное распределение предполагает диаметр частиц по Мартину $l > 5$ нм, но это отражает лишь тот факт, что метод не позволяет идентифицировать частицы $^{239}\text{PuO}_2$ меньшего размера и, следовательно, никаких предположений по распределению частиц меньше 5 нм сделать невозможно. "Увидеть" более мелкие частицы можно, увеличив флюенс нейтронного облучения (3)-(4).

По результатам собственных исследований указано, что доля быстрой фракции кинетики диализа субмикронных аэрозолей более чем на порядок величины превышала значения, характерные для аэрозолей микронного диапазона.

Полученный результат можно использовать как априорное распределение по размерам наночастиц при расчёте дозовой нагрузки от внутреннего облучения от ^{239}Pu на персонал отделения оксидного осаждения завода РТ ПО "Маяк" при расчёте байесовским методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. – пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
2. International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. – Oxford: Pergamon Press, 1994. – 482 p.
3. Dorrian M.D., Bailey M.R. Particle size distributions of radioactive aerosols measured in workplaces // Radiat. Prot. Dosimetry. – 1995. – V. 60. – No. 2. – P. 119–133.
4. Yeh H.C. A fundamental study of aerosol filtration by fibrous filters / Ph. D. Thesis, University of Minnesota. – 1972.
5. Davies C.N. Air filtration. – Academic Press, New York. – 1973.
6. Kirsch A.A., Stechkina I.B. Fundamentals of aerosol science // New York. – 1978. – Chap. 4. – P. 165.
7. Diel J.H., Mewhinney J.A. Fragmentation of inhaled $^{238}\text{PuO}_2$ particles in lung // Health Physics. – 1983. – V. 44. – No. (February). – P. 135–143.
8. Аладова Е.Е. Исследование дисперсности альфа-активных промышленных аэрозолей методом авторадииграфии // Вопросы радиац. безопасности. – 2002. – № 4. – С. 17–21.
9. Сыпко С.А., Введенский В.Э., Ишунина М.В., Суслова К.Г. Косвенный метод расчёта стандартной неопределённости при оценке транспортабельности производственных альфа-излучающих аэрозолей // Вопросы радиац. безопасности. – 2020. – № 2. – С. 75–81.
10. Методика выполнения измерений плутония-239, содержащегося в промышленных альфа-излучающих наночастицах. Свидетельство об аттестации методики радиационного контроля № 4390.2.П397 от 27.09.2012. ФР.1.38.2012.13346.
11. Хохряков В.В., Введенский В.Э., Сыпко С.А. и др. Результаты исследований по разработке нейтронно-индуцированного метода измерения размеров наночастиц диоксида ^{239}Pu // Вопросы радиац. безопасности. – 2014. – № 3. – С. 69–81.
12. Введенский В.Э., Сыпко С.А., Бобов Г.Н. Совершенствование нейтронно-индуцированного метода измерений размеров наночастиц диоксида ^{239}Pu // АНРИ. – 2019. – № 2. – С. 79–90.
13. Введенский В.Э., Сыпко С.А., Бобов Г.Н. Определение диаметра наночастицы $^{239}\text{PuO}_2$ с использованием нейтронно-индуцированного метода и расчёт стандартной неопределённости диаметра наночастицы // АНРИ. – 2019. – № 4. – С. 38–50.
14. Сыпко С.А., Введенский В.Э., Бобов Г.Н. Исследования статистических характеристик распределения размеров наночастиц $^{239}\text{PuO}_2$ в воздухе отделения оксидного осаждения завода регенерации топлива ПО "Маяк" с использованием нейтронно-индуцированного метода измерения // Вопросы радиац. безопасности. – 2019. – № 2. – С. 71–79.
15. Патент RU 2733491 C2. Способ определения количества ядер радиоактивного нуклида частицы, включающий облучение частицы в поле тепловых нейтронов при воздушной среде между частицей и мишенью / В.Э. Введенский
16. Джонсон Н.Л., Коц С., Кемп А.У. Одномерные дискретные распределения. – пер.

2-го англ. изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 559 с.

17. Джонсон Н.Л., Коц С., Балакришнан Н. Одномерные непрерывные распределения: в 2 ч. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, Ч. 1. – 2010. – 703 с.

18. Сыпко С.А., Бобов Г.Н., Введенский В.Э., Назаренкова А.В. Исследование микрораспределения ^{239}Pu в лёгких работников ПО "Маяк" с использованием нейтронно-индуцированного метода измерения // Мед. радиология и радиац.

безопасность. – 2020. – № 4. – С. 12–21.

19. Аладова Е.Е., Бобов Г.Н., Введенский В.Э. и др. Физико-химические характеристики промышленных альфа-излучающих аэрозолей: данные многолетних исследований. Монография. – СПб.: Научно-технологические, 2023. – 382 с.

20. Fleischer R.L., Raabe O.G. On the mechanism of "dissolution" in liquids of PuO_2 by alpha decay // Health Physics. – October 1978. – V. 35. – P. 545–548.

УДК 614.876; 546.11.027*3; 001.891.5
© 2023

**ИТОГИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛАБОРАТОРИИ
РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ № 6 ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА БИОФИЗИКИ ЗА 2012–2022 ГОДЫ**

В.В. Востротин, А.Ю. Янов, Л.В. Финашов
Россия, г. Озёрск, ФГБУН Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России

Статья содержит сведения о формировании лаборатории № 6 ЮУрИБФ, используемом оборудовании и методиках измерений, взаимодействии с подразделениями ЮУрИБФ и основных направлениях деятельности. Представлены результаты многолетних исследований персонала ПО "Маяк", населения г. Озёрска и окружающей среды, а также работ по созданию и совершенствованию дозиметрических систем ДТС-2019 и iDose 2.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТРИТИЙ, ПЕРСОНАЛ, НАСЕЛЕНИЕ, РАДИОЭКОЛОГИЯ, ВНУТРЕННЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Лаборатория радиационной безопасности № 6 ЮУрИБФ была образована в 2011 г. в составе отдела радиационной безопасности (зав. отд., к. м. н. Ф.Д. Третьяков). Первоначально основным направлением деятельности была реконструкция доз внутреннего облучения от трития работников химического производства Производственного объединения (ПО) "Маяк". Впоследствии перед лабораторией были поставлены задачи оценки влияния ПО "Маяк" на уровни объёмной активности трития в различных природных объектах (водоёмы, растения, воздух) и, как следствие, влияния на оценки доз от трития на население. Для решения этих задач лаборатория была оснащена современным оборудованием мирового уровня. После введения в эксплуатацию в 2014 г. ультра-низкофоновый альфа-бета спектрометра-радиометра Quantulus-1220, позволяющего проводить измерения удельной/объёмной активности трития, радиоуглерода и других радионуклидов в различных образцах с помощью жидкостно-сцинтилляционного метода (ЖСМ), начались радиоэкологические исследования. В 2015 г. лаборатория была оснащена системой пробоподготовки Sample Oxidizer A307, позволяющей в автоматическом режиме извлекать соединения трития и/или радиоуглерода из анализируемой пробы и произвести счётные образцы в смеси с жидкими сцинтилляторами (ЖС) для последующего измерения на Quantulus-1220. В спектр

исследований был включён поиск зависимостей от различных факторов вклада органических соединений трития (ОСТ) в биологических пробах персонала и пробах окружающей среды. Для расширения возможностей радиоэкологических исследований в 2015 г. лаборатория была дооснащена гамма-спектрометром на кристалле особо чистого германия (ОЧГ).

В настоящее время основными направлениями деятельности лаборатории являются:

- радиационно-гигиенические исследования, связанные с внутренним облучением тритием работников химического производства ПО "Маяк" и населения г. Озёрска;
- радиоэкологические исследования, направленные на изучение пространственного распределения различных радионуклидов (в основном – трития) в окружающей среде зоны влияния ПО "Маяк" и озера Кызылташ;
- создание и совершенствование дозиметрических систем внутреннего облучения работников атомной промышленности.

Сотрудники лаборатории приняли участие в региональных, всероссийских и международных научных конференциях. Деятельность сотрудников лаборатории отмечена ведомственными наградами ФМБА России. За годы работы лабораторией был накоплен большой теоретический и практический опыт в изучении трития. Эксперты РАН оценили научные исследования, проводимые в лаборатории,

как соответствующие мировому уровню. Международная организация МАГАТЭ пригласила заведующего лабораторией, к.б.н. В.В. Востротина в качестве эксперта по созданию документа "Поведение трития в окружающей среде". На рис. 1 представлено фото личного состава лаборатории № 6 ЮУриБФ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В лаборатории совместно с подразделениями ЮУриБФ организованы системы отбора проб крови и мочи персонала химического производства ПО "Маяк", при непосредственной помощи сотрудников лаборатории № 8 ЮУриБФ (зав. лаб., к.м.н. Е.И. Рабинович) на базе АСДОК Клинической больницы № 71 ФМБА России (г. Озёрск) – до 150 человек

ежегодно. Дополнительная часть биопроб была собрана ранее на базе Клинического отдела ЮУриБФ (зав. отд. к.м.н. Т.В. Азизова). Системы отбора проб мочи населения г. Озёрска для определения доз внутреннего облучения от трития; сбора проб окружающей среды зоны влияния ПО "Маяк" для определения пространственного распределения трития была разработана непосредственно сотрудниками лаборатории № 6. В становлении данной системы принял непосредственное участие д.б.н. А.И. Смагин; Отбор проб из промышленного водоёма В-2 (оз. Кызылташ) и с прилегающей к нему территории для определения миграции трития и $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ осуществлялся при активном участии сотрудников ЮУРАМДЦ ЮУриБФ (рук. А.И. Алдошин).

Лаборатория выполняла научные ис-



Рис. 1. Фото личного состава лаборатории № 6 ЮУриБФ. Сидят (слева направо): лаборант-исследователь И.В. Завьялова, зав. лаб. В.В. Востротин, научный сотрудник А.Ю. Янов. Стоят (слева направо): лаборант-исследователь А.К. Маценко, научный сотрудник Л.В. Финашов

следования в рамках ФЦП "Промышленная утилизация вооружения и военной техники ядерного комплекса на 2011–2015 годы и на период до 2020 года": НИР шифры "Элемент", "Элемент-14", "Элемент-17", "Элемент-20", в рамках Государственных контрактов по развитию организационного и методического обеспечения ИДК профессионального внутреннего облучения: НИР шифры "Импульс-13" ... "Импульс-15", "Спектр-16", "Контроль-17" ... "Контроль-20", "Контроль-22", "Луч-22", в рамках Государственной программы "Развитие здравоохранения" НИР шифр "Кызылташ-21"; участвовала в Проекте 2.4 Министерства энергетики США "Дозиметрия персонала ПО "Маяк" (рук. зав. отд. дозиметрии и радиационной безопасности А.В. Ефимов) по созданию дозиметрических систем внутреннего облуче-

ния персонала от плутония MWDS-2013 [1] и MWDS-2016 [2]. На рис. 2 представлено фото сотрудников лаборатории № 6, выполняющих работы в полевых условиях.

В ходе выполнения этих научных исследований были разработаны методики измерения (МИ):

1. Объёмной активности (ОА) трития в пробах воды и мочи. Метрологически аттестована, предел обнаружения 8 Бк/л, номер в реестре "АРШИН" ФР.1.31.2019.33599, свидетельство об аттестации №222.0032/RA.RU.311866/2019. Разработана при активном участии инженера-химика ЦЗЛ ПО "Маяк" Е.Л. Мурашовой.

2. Объёмной активности трития (в форме паров НТО) в воздухе.

3. Объёмной активности органических соединений трития (ОСТ) в моче. Метрологически



Рис. 2. Фото сотрудников лаборатории № 6 ЮУрИБФ, выполняющих работы в полевых условиях. Слева направо: В.В. Востротин, Л.В. Финашов, А.Ю. Янов, А.К. Маценко, И.В. Завьялова

аттестована, предел обнаружения 50 Бк/л, свидетельство об аттестации №222.0121/RA.RU.311866/2020. При разработке методики по заказу в МГУ им. М.В. Ломоносова был создан уникальный образец тритированного креатинина.

4. Объёмной активности НТО внутриклеточной воды в растениях.

5. Удельной активности $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ в растениях (на базе измерительного оборудования ЮУрАМДЦ ЮУрИБФ – рук. А.И. Алдошин).

6. Объёмной активности трития, ^{40}K и $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ в воде или моче. Создано программное обеспечение Aspect-SUBI (разработчик – Введенский В.Э., ведущий программист лаборатории № 2 ЮУрИБФ) по разложению бета-спектра Quantulus-1220 из смеси радионуклидов, позволяющее определять уровни данных радионуклидов в жидких средах без проведения

пробоподготовки [3]. Получен патент на способ идентификации β -излучающих радионуклидов в жидких пробах с использованием жидкостно-сцинтилляционного счётчика RU 2746412 C1 [4]. На рис. 3 представлено фото сотрудников лаборатории № 6, обсуждающих результат работы программы Aspect-SUBI.

Лаборатория участвует в межлабораторных сличительных испытаниях (МСИ) по измерению удельной/объёмной активности трития в воде, проводимых ГК "Росатом", оказывает услуги заинтересованным организациям по данным измерениям.

Созданы методические документы:

1. СП-4-6-2016 ЮУрИБФ "Методика выполнения расчётов доз облучения населения, проживающего в зоне влияния предприятия по утилизации ядерных боеприпасов. Методические указания по методам контроля".



Рис. 3. Фото сотрудников лаборатории № 6, обсуждающих результат работы программы Aspect-SUBI. Сидят (слева направо): А.Ю. Янов и В.В. Востротин

Содержит методику расчётов доз от трития для населения по измерениям ОА трития в моче.

2. Методические рекомендации МР ФМБА России 06.047-2016 "Методические рекомендации по измерению органически связанного трития в воде и моче".

3. МУК 2.6.1.033-2013 "Расчёт ожидаемых эффективных доз от плутония и америция при стандартных условиях облучения. Методика выполнения расчёта". Содержит методику расчётов ОЭД от плутония и америция для персонала, находящегося на индивидуальном дозиметрическом контроле (ИДК) внутреннего облучения. Создано программное обеспечение iDose.

4. МУК 2.6.5.045-2016 "Указания по методам контроля (МУК) для определения доз внутреннего облучения персонала при стандартных и специальных условиях. Методика выполнения расчётов". Содержит методику выполнения расчётов ОЭД от трития, плутония и америция для персонала. Создано программное обеспечение iDose 2 с хранением результатов измерений и результатов расчётов ОЭД в базе данных (при непосредственном участии Жданова А.Н., программиста лаборатории № 3 ЮУрИБФ). Получен патент на способ индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения профессиональных работников с помощью компьютерной программы "iDose 2" RU 2650075 C2 [5].

5. МУК 2.6.5.038-2019 "Методика выполнения расчёта доз внутреннего облучения тритием с учётом органических соединений. Методические указания по методам контроля".

Разработанные методики измерения и методические документы находят своё применение в практике лабораторий, отделов ЮУрИБФ и научных организаций ФМБА.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Персонал ПО "Маяк"

В течение 2014–2019 гг. была создана методика реконструкции доз внутреннего облучения тритием когорты химического производства ПО "Маяк", состоявшая из четырёх частей. Первая часть была основана на архивных записях эквивалентных доз в период с 1967 по

1999 гг. и эффективных доз на всё тело в период с 2000 по 2008 гг., оцененных дозиметрической службой производства. Для перевода эквивалентной дозы, выраженной в бэр, или эффективной дозы на всё тело, выраженной в мЗв, в поглощённую дозу на мягкие ткани, выраженную в Гр, были использованы специальные коэффициенты (всего было сделано 22023 оценки в период с 1967 по 2008 гг. для 1949 работников). Вторая часть реконструкции была основана на усреднённых оценках доз для работников 1-го и 2-го цехов химического производства, сгруппированных по профессиям (всего 2176 оценок доз в период с 1964 по 1971 гг. для 503 работников). Третья часть реконструкции была основана на построенной ранее модели эквивалентных годовых доз в зависимости от объёмных активностей трития в воздухе рабочих помещений и профессии (всего 514 оценок доз в период с 1961 по 1966 гг. для 199 работников). Четвёртая часть реконструкции доз относилась к периоду наиболее неблагоприятных условий труда в период освоения технологии производства трития (всего 461 оценка доз в период с 1952 по 1955 гг. для 163 работников). На заключительном этапе в поглощённой дозе внутреннего облучения учитывался дополнительный вклад ОСТ, составлявший в среднем 7 %. Итоговый набор из 25174 оценок поглощённых доз на мягкие ткани в период с 1952 по 2008 гг. являлся дозиметрической тритиевой системой для 2253 работников исследуемой когорты ПО "Маяк", условно – ДТС-2019 [6].

В 2017–2019 гг. было проведено исследование, направленное на оценку уровней ОА соединений трития, в том числе ОСТ в пробах мочи работников химического производства ПО "Маяк", и выявление связей этих оценок с профессиональной деятельностью (отделением и специальностью). Было собрано 245 проб у 171 работника. Суммарная ОА трития находилась в широком диапазоне: от ~30 до ~250 кБк/л (4 порядка величины), ОА ОСТ в моче: от ~6 до ~3000 Бк/л (3 порядка величины). Доля ОСТ в моче варьировалась от 0,07 до 74 % и подчинялась логнормальному распределению со средним геометрическим (GM) 2,7 % и стандартным геометрическим отклонением (GSD), равным 3,7. Медиана суммарной ОА трития в моче работников 1-го цеха (~2100 Бк/л) и

аналитической лаборатории (~7500 Бк/л) была больше, чем аналогичный показатель работников 2-го цеха (~500 Бк/л). Различия по медиане как суммарной ОА трития, так и ОА НТО в моче в зависимости от профессии были выявлены только у работников 1-го цеха (максимальные уровни – у аппаратчиков и слесарей-ремонтников) [7].

В 2019–2020 гг. было проведено биофизическое обследование работника ПО "Маяк", в организм которого произошло поступление трития вследствие нарушения герметичности трубопровода тяжеловодного реактора. Было собрано шесть проб мочи в период с 11 по 16 сутки и две пробы мочи на 198 и 199 сутки после инцидента. Оценка ожидаемой эффективной дозы (ОЭД) внутреннего облучения составила 7,4 мЗв с фактором неопределённости (отношением 97,5 % квантиля к среднему значению) $UF = 1,14$. Вклад ОСТ в дозу находился в диапазоне от 0,3 до 2 % [8].

Население г. Озёрска

В 2016 г. было собрано 30 проб мочи у жителей г. Озёрска. Уровни ОА трития в моче составили $18,5 \pm 1,1$ Бк/л ($n = 22$) и $12,6 \pm 2,3$ Бк/л ($n = 8$) для взрослого и детского населения соответственно. Было выявлено, что ОА трития в биопробах зависела от источника питьевого водоснабжения, а не от возраста. В случае использования только водопроводной воды из оз. Иртяш ОА трития в моче была выше в 1,8 раза ($18,1$ Бк/л : $10,1$ Бк/л) в сравнении с использованием водопроводной воды с дополнительными источниками (бутилированная и пр.). Оценки ОЭД от трития для исследованной группы населения г. Озёрска подчинялись нормальному закону распределения со средним значением 0,27 мкЗв и коэффициентом вариации 36 %. Максимальное значение составило 0,49 мкЗв, что меньше предела дозы 1 мЗв для населения, согласно НРБ-99/2009, в ~2000 раз [9].

Окружающая среда зоны влияния ПО "Маяк"

В обзорной статье 2016 г. была показана необходимость исследований окружающей среды, находящейся в зоне влияния выбросов трития предприятиями Уральского региона, с

позиций радиологической защиты [10]. В 2014–2015 гг. было проведено радиоэкологическое исследование зоны влияния ПО "Маяк" для оценки динамики ОА трития в различных объектах окружающей среды за 13–14 лет. Уровень ОА трития в 23 пробах воды открытых водоёмов на расстоянии от 6 до 78 км находился в диапазоне от < 8 Бк/л до 61 Бк/л, среднее 21 ± 4 Бк/л, медиана 18 Бк/л, и был более чем на два порядка величины меньше уровня вмешательства (УВ), равного 7600 Бк/кг (или 7600 Бк/л для питьевой воды) по НРБ-99/2009. Было выявлено уменьшение в 1,4 раза по среднему геометрическому ОА в пробах воды в сравнении с 2001–2003 гг. ($GM = 0,71$, $GSD = 1,62$, $n = 19$), что могло свидетельствовать об уменьшении выбросов трития в воздух с ПО "Маяк".

Уровни ОА трития в пробах воды из 11 скважин около оз. Иртяш, в г. Касли и п. Большой Куяш, т. е. на удалении до 30 км от ПО "Маяк", были в диапазоне от < 8 Бк/л до 43 Бк/л, в среднем 22 ± 5 Бк/л, медиана 20 Бк/л. Не было обнаружено изменения по медиане с аналогичными измерениями по скважинам в период с 2005 по 2006 гг. (медиана 23 Бк/л).

Уровень ОА трития в 12 пробах месячных осадков, отобранных в 2014 г. в г. Озёрске, составлял в среднем 40 ± 4 Бк/л. Также было выявлено снижение уровней ОА в пробах суточных осадков в 3,2 раза по сравнению с результатами исследований 2007 г., что дополнительно подтверждало гипотезу об уменьшении выбросов трития в воздух с ПО "Маяк".

По результатам измерения четырёх параллельных проб уровень ОА трития в пробах воды промышленного водоёма В-2 (оз. Кызылташ) в 2015 г. составлял $11,2 \pm 0,5$ кБк/л и превышал в ~1,7 раза средний уровень периода с 2007 по 2009 гг. [11].

Уровни ОА трития в 23 пробах снега, сформировавшегося в течение осенне-зимнего сезона 2015–2016 гг., находились в диапазоне от < 8 Бк/л (г. Челябинск, п. Б. Куяш, п. М. Куяш) до 112 Бк/л (санитарно-защитная зона (СЗЗ) ПО "Маяк"). Была построена модель убывания ОА трития в снеге в зависимости от расстояния $OA_{\text{снег}} = (9,0 \pm 3,4) + (136 \pm 39)e^{-(0,14 \pm 0,04)r}$ Бк/л, где r – расстояние от ПО "Маяк", км. Таким образом, период полуубывания ОА трития в снеге был равен $5,0 \pm 1,4$ км, при постоянной составля-

ющей $9,0 \pm 3,4$ Бк/л. Был оценен радиус зоны значимого влияния ПО "Маяк" по выбросам трития в воздух, равный 30 км [12].

В марте 2016 г. параллельно с пробами снега было собрано 19 проб берёзового сока. Уровни ОА трития в берёзовом соке находились в диапазоне от < 8 Бк/л (г. Челябинск) до 190 Бк/л (СЗЗ ПО "Маяк"). В парных пробах снега и берёзового сока не было найдено различий по ОА трития. Модель убывания ОА трития в берёзовом соке в зависимости от расстояния $OA_{\text{сок}} = (9,5 \pm 4,5) + (137 \pm 52)e^{-(0,130 \pm 0,046)r}$, Бк/л, имела оценки параметров, близкие к аналогичным оценкам параметров для модели по снегу. Период полуубывания ОА трития в берёзовом соке составил $5,3 \pm 1,9$ км. Модель нормального распределения ОА трития в берёзовом соке в зависимости от географических координат с постоянной составляющей оказалась более предпочтительной, чем модель зависимости только от расстояния [13].

Промышленный водоём В-2 (оз. Кызылташ)

В 2021 г. было проведено радиоэкологическое исследование прибрежной зоны оз. Кызылташ. Уровень ОА трития в 33 пробах воды, собранных с апреля по сентябрь, составлял в среднем 15,7 кБк/л при стандартном отклонении 1,1 кБк/л, и более чем в 2 раза превышал УВ по НРБ-99/2009. Среднее значение уровня ОА трития в воде в 2021 г. было в 2,3 раза больше, чем аналогичный показатель в 2007–2009 гг., равный 6730 ± 830 Бк/л (11 проб). При неравномерном поступлении трития в атмосферу по месяцам 2021 г. максимальные значения были установлены в мае и июне. Оценка суммарного поступления трития в воздух с поверхности озера в форме паров НТО, полученная на основе среднемесячных показателей температуры, влажности и ОА трития в пробах воды, составила 196 ТБк. Эта оценка была на порядок ниже выбросов в атмосферу трития ПО "Маяк" за 2020 г. и была близка к значениям суммарных выбросов всех остальных предприятий РФ, осуществляющих регламентируемые выбросы трития в атмосферу в 2020 г. (179 ТБк).

В течение периода наблюдения 2021 г.

было выявлено уменьшение ОА трития в пробах воды оз. Кызылташ с общим периодом полуубывания ~ 500 сут. Построенная модель зависимости ОА трития в воде от времени позволила оценить водный баланс водоёма в предположении отсутствия сбросов трития. При допущении о том, что за безледоставный период, равный 210 сут (7 мес), общая убыль объёма воды в озере составила 7,5 %, приходная часть водного баланса "чистой воды" составила 20,9 млн m^3 , а его расходная часть в 2021 г. была равна 27,2 млн m^3 . Вклад испарения с поверхности водоёма в расходную часть баланса составил 44,9 % или 12,2 млн m^3 . Остальная вода в объёме 15 млн m^3 была использована для нужд предприятия ПО "Маяк" и инфильтрована в грунт, что характерно для горных озёр [14].

В том же 2021 г. было проведено исследование прибрежных растений вблизи оз. Кызылташ, в ходе пяти экспедиций собрано и проанализировано 40 проб растений (трава и листья берёзы) и 20 проб транспирационной воды от листьев берёзы. Было выявлено две зоны: 0... ~ 5 м и ~ 5 ... ~ 100 м от береговой линии, отличающихся по уровню ОА трития как во внутриклеточной воде, так и в транспирационной воде растений на порядок величины (среднее геометрическое в зоне 0... ~ 5 м составляло 1680 ... 5471 Бк/л для различных типов проб, в зоне ~ 5 ... ~ 100 м – 240 ... 390 Бк/л). Были построены модели экспоненциального убывания влажности и ОА трития в растениях, периоды полуубывания в которых составили 262 и 64 сут соответственно. Разработана методика определения уровней поступления трития с испарениями от прибрежных растений оз. Кызылташ. Оценка общей суммарной активности трития, поступившего в воздух в форме НТО, была равна $\sim 0,7$ ТБк, что сопоставимо с выбросами Ленинградской АЭС в 2021 г. (0,692 ТБк). Подавляющий вклад (99,6 %) в поступление от растений внёс процесс транспирации в течение вегетационного периода. Несмотря на меньшую в 5,1 раза площадь почвы, наибольший вклад (81,8 %) в поступление трития в воздух внесли растения зоны 0... ~ 5 м от береговой линии в сравнении с зоной ~ 5 ... ~ 100 м (18,1 %) [15].

Дозиметрическая система iDose 2

В течение 2013–2015 гг. разработана дозиметрическая система iDose2, позволяющая оценивать уровни ОЭД и их неопределённости для индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внутреннего облучения при поступлении трития, ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{241}Am [16–18]. Исходными данными для расчётов являются периоды контроля с типами соединений и серии измерений активности радионуклидов в органах и/или биопробах. Особенностью системы является возможность использования "недоверенных" результатов измерения, не превышающих предел обнаружения. В 2016 г. дозиметрическая система iDose 2 была утверждена на уровне ФМБА в виде методических указаний МУК 2.6.5.045-2016, содержащих методику выполнения расчётов. В 2017 г. дозиметрическая система iDose 2 была внедрена в Сибирском биофизическом научном центре (СБНЦ) ФМБА России (г. Северск).

В течение 2018–2022 гг. в систему были добавлены функции выведения/удержания и дозовые коэффициенты для $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ по стандартным биокинетическим моделям, добавлена возможность использования различных размеров частиц при поступлении изотопов плутония, внедрены функции выведения/удержания по новейшим биокинетическим моделям поведения радионуклидов в организме из Публикаций серии ОИР МКРЗ [19].

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из актуальности проблем в области радиационной безопасности персонала и населения, защиты окружающей среды, а также накопленного опыта, направлениями будущей деятельности лаборатории являются:

1. Улучшение дозиметрической системы ДТС-2019.
2. Продолжение исследования влияния факторов на оценку объёмной активности различных соединений трития, в том числе ОСТ, в биопробах персонала химического производства ПО "Маяк".
3. Изучение динамики ОА трития в пробах мочи и доз внутреннего облучения от данного радионуклида у населения г. Озёрска.

4. Расширение спектра изучаемых радионуклидов в окружающей среде зоны влияния ПО "Маяк". Изучение динамики распределения радионуклидов (прежде всего — трития, радиоуглерода, $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$) в различных природных объектах.

5. Продолжение исследований по миграции радионуклидов из промышленного водоема В-2 (оз. Кызылташ).

6. Оценка неопределённостей методики измерения объёмной активности трития, ^{40}K и $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ в жидких пробах без пробоподготовки, с дальнейшей метрологической аттестацией.

7. Обновление методических рекомендаций по оценке дозы внутреннего облучения от трития с учётом ОСТ. Создание компьютерной программы расчёта доз.

8. Внедрение дозиметрической системы iDose 2 в практику лабораторий дозиметрии внутреннего облучения (ЛДВО) ФМБА России.

9. Создание новой дозиметрической системы jDose по оценке доз и их неопределённостей для инцидентных/аварийных случаев при ингаляционном или перкутанном поступлении актинидов в организм работника.

ЛИТЕРАТУРА

1. Birchall A., Vostrotin V., Efimov A. et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2013) for internally deposited plutonium: An overview // Radiat. Prot. Dosimetry. — 2017. — V. 176. — No. 1-2. — P. 10–31.
2. Vostrotin V.V., Napier B.A., Zhdanov A.V. et al. The Mayak worker dosimetry system (MWDS-2016): internal dosimetry results and comparison with MWDS-2013 // Radiat. Prot. Dosimetry. — 2019. — V. 184. — No. 2. — P. 201–210.
3. Востротин В.В., Введенский В.Э. Разработка и верификация метода разложения β -спектра смеси радионуклидов на основе кусочно-комбинированных функций с полиномиальной или кусочно-линейной аппроксимацией их параметров // АНРИ. — 2023. — No. 3. — С. 26–44.
4. Патент RU 2746412 C1. Способ идентификации бета-излучающих радионуклидов в пробах с использованием жидкостного сцинтилляционного счётчика: пат. RU2746412C1 / В.Э. Введенский et al.; заявл. 04.12.2019; опубл. 13.04.2021.

5. Патент RU 2650075 C2. Способ индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения профессиональных работников с помощью компьютерной программы "iDose 2": / В.В. Востротин et al.; опубл. 2018.
6. Отчёт о научно-исследовательской работе. Анализ радиационного риска и медико-дозиметрическое сопровождение при работе с соединениями трития (заключительный): ЮУрИБФ / рук. Востротин В.В. – 2019. – 97 с.
7. Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Тритий в моче профессиональных работников ПО "Маяк" в период с 2017 по 2019 гг. // Радиационная гигиена. – 2021. – Т. 14. – № 1. – С. 102–110.
8. Vostrotin V.V., Yanov A.Y., Finashov L.V. Assessment of the committed effective dose equivalent and its uncertainty from incidental internal tritium exposure // Radiat. Prot. Dosimetry. – 2022. – V. 198. – No. 8. – P. 448–453.
9. Финашов Л.В., Востротин В.В., Янов А.Ю. Тритий в моче у жителей города Озёрска Челябинской области в 2016 г. // Радиационная гигиена. – 2019. – Т. 12. – № 3. – С. 42–49.
10. Янов А.Ю., Востротин В.В., Финашов Л.В. Тритий в окружающей среде уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты // Человек. Спорт. Медицина. – 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 85–99.
11. Vostrotin V., Yanov A., Finashov L. Tritium in environmental objects in the area affected by FSUE Mayak Production Association in 2014–2015 // J. of Radiological Protection: Official J. of the Society for Radiological Protection. – 2021. – V. 41. – No. 2. – P. 56–66.
12. Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Накопление трития в снежном покрове зоны влияния ПО "Маяк" за осенне-зимний сезон 2015–2016 гг. // Вопросы радиац. безопасности. – 2017. – Т. 87. – № 3. – С. 63–67.
13. Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В. Соотношение объёмной активности трития в талом снеге и берёзовом соке в зоне влияния Производственного объединения "Маяк" весной 2016 года // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2020. – Т. 60. – № 3. – С. 298–304.
14. Востротин В.В., Янов А.Ю. Оценка уровня годового поступления трития в воздух с поверхности озера Кызылташ // Радиационная гигиена. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 88–96.
15. Востротин В.В., Финашов Л.В. Оценка поступления трития в воздух от прибрежных растений озера Кызылташ в 2021 г. // Радиационная гигиена. – 2023. – Т. 16. – № 2. – С. 78–90.
16. Востротин В.В., Жданов А.Н., Ефимов А.В. Индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) внутреннего облучения профессиональных работников с помощью компьютерной программы "iDose 2" на основе Байесовского подхода // Вопросы радиац. безопасности. – 2016. – Т. 82. – № 2. – С. 45–54.
17. Востротин В.В., Жданов А.Н., Ефимов А.В. Тестирование системы индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внутреннего облучения профессиональных работников при ингаляционном поступлении нерастворимых соединений плутония с помощью компьютерной программы iDose 2 // Вопросы радиац. безопасности. – 2016. – Т. 83. – № 3. – С. 78–83.
18. Востротин В.В., Жданов А.Н., Ефимов А.В. Апробация компьютерной программы iDose 2 применительно к задачам индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) внутреннего облучения персонала ФГУП "ПО "Маяк" при ингаляционном поступлении плутония // АНРИ. – 2017. – Т. 91. – № 4. – С. 45–54.
19. Востротин В.В. Интеграция моделей Oir МКРЗ в дозиметрическую систему iDose 2 // Мед. радиология и радиац. безопасность. – 2023. – № 4. (в печати)

ПАМЯТИ АЛЕКСАНДРА ВИКТОРОВИЧА ТРАПЕЗНИКОВА



29 июня 2023 года ушёл из жизни Трапезников Александр Викторович – незаурядная личность, крупный учёный – руководитель Биофизической станции и заведующий отделом континентальной экологии Института экологии растений и животных УрО РАН, доктор биологических наук, заслуженный эколог Российской Федерации.

Александр Викторович родился в г. Пермь. В 1973 г. окончил биологический факультет Пермского государственного университета им. А.М. Горького. С 1974 г. работал в Институте экологии растений и животных Уральского отделения РАН. С 1993 г. по настоящее время руководил Биофизической станцией и отделом континентальной радиоэкологии ИЭРиЖ УрО РАН в г. Заречном Свердловской области. Главным научным направлением всей его научной деятельности была пресноводная радиоэкология, которой он посвятил 50 лет.

В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию "Накопление, распределение и миграция ^{60}Co в компонентах пресноводной экосистемы". В 2001 г. защитил докторскую диссертацию "Радиоэкология пресноводных экосистем (на примере Уральского региона)".

Самым крупным научным достижением Александра Викторовича являются масштабные исследования, в которых определены закономерности накопления, пространственной и временной миграции таких техногенных радионуклидов как ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{137}Cs в различных компонентах (в воде, донных отложениях, ихтиофауне, макрофитах, пойменных почвах) речных экосистем Теча-Исеть-Тобол-Иртыш-Обь, озёр и искусственных водохранилищ Уральского региона (Восточно-Уральский радиационный след (ВУРС), Белоярская атомная станция).

В своей работе Александр Викторович являлся продолжателем идей и традиций Николая Владимировича Тимофеева-Ресовского, который возглавлял лабораторию радиационной биогеоценологии и биофизики Института биологии УФАНа. На протяжении многих лет Александр Викторович являлся организатором, идейным вдохновителем и неизменным ведущим семинаров "Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин". В них участвовали ведущие учёные из разных стран мира, из всех регионов нашей страны, которые представляют различные отрасли науки и производства, связанные с ядерными технологиями. Александру Викторовичу удалось консолидировать радиоэкологов и радиобиологов с учёными из различных областей науки, что позволило создать творческий интеллектуальный научный центр на базе регулярных ежегодных семинаров. Научная, организационная, просветительская деятельность Александра Викторовича сделала Биофизическую станцию и отдел континентальной радиоэкологии ИЭРиЖ УрО РАН признанным крупным международным научным радиоэкологическим центром.

Александр Викторович имел более 460 научных трудов, из них 14 монографий, 10 патентов.

Научные достижения Александра Викторовича признаны российским и зарубежным научным сообществом, отмечены рядом наград. Он заслуженный эколог Российской Федерации, лауреат Международного конкурса научных работ в области радиоэкологии имени акад. В.М. Ключковского и премии имени Н.В. Тимофеева-Ресовского Уральского отделения РАН, награждён медалью акад. Е.Н. Аврорина за цикл работ "Перенос и распределение техногенных радионуклидов в реках, озёрах и искусственном водохранилище Урало-Сибирского региона, подверженных воздействию предприятий атомного комплекса".

Александр Викторович был редким по глубине и широте знаний эрудитом, ценителем русской и мировой литературы, истории, песенного и устного фольклора. Таланты учёного в нём сочетались с искренней душевной теплотой и деятельной заботой о людях. Своей жизнью и научным творчеством он снискал любовь и уважение огромного количества друзей, соратников и коллег. Александр Викторович был редким образцом настоящего Учёного и русского Интеллекта.

RADIATION SAFETY PROBLEMS

Scientific Journal

FEDERAL STATE UNITARY ENTERPRISE "MAYAK" Production Association
State Atomic Energy Corporation Rosatom

№ 3 (111) 2023

CHIEF EDITOR Yu.G. MOKROV

DEPUTY CHIEF EDITOR I.G. TANANAEV

EDITORIAL ADVISORY COMMITTEE

A.V. Akleyev, V.N. Bolshakov, L.A. Bolshov, V.I. Velichkin, Ye.A. Demchenko
(publ. manager), M.V. Zhukovsky, I.A. Ivanov, L.A. Ilyin, S.N. Kalmykov,
P.V. Kozlov, D.N. Kolupaev, N.A. Koshurnikova, A.I. Kryshev, A.A. Kuvaev,
I.I. Linge, M.V. Logunov, B.F. Myasoedov, V.N. Pozolotina, Ye.A. Pryakhin,
S.A. Romanov, M.E. Sokolnikov, Ye.I. Tolstykh, S.S. Utkin, A.P. Khomyakov,
V.F. Khokhryakov, Ye.A. Shishkina, S.V. Yudintsev, Yu.T. Yuldashev

CONTENTS

The 70-th Anniversary of Southern Urals Biophysics Institute	3
1. RADIATION SAFETY	
A.V. Yefimov, A.B. Sokolova, K.G. Suslova. Main Results of Scientific and Practical Activities of Southern Ural Biophysics Institute in the Field of Radiation Safety	4
Ye.Ye. Aladova, A.I. Aldoshin, L.V. Finashov, V.A. Marov, Ye.V. Romanov. Monitoring of Radiation Situation in the Mayak PA Radiation-Control Area	16
Ye.Ye. Aladova, A.V. Yefimov, A.I. Aldoshin, L.L. Khoreshko. Response to Radiation Incidents in the Area of Responsibility of Southern Urals Regional Emergency Medical-Dosimetric Center of FMBA of Russia	25
2. RADIATION EXPOSURE & HUMAN HEALTH	
V.L. Rybkina, D.S. Oslina, T.V. Azizova, Ye.D. Drugova, G.V. Adamova. Growth Factors in Individuals Exposed to Occupational Chronic Irradiation	33
M.E. Sokolnikov, N.R. Kabirova, P.V. Okatenko, N.A. Koshurnikova, Yu.V. Tsareva, I.A. Martinenko, Ye.V. Denisova. Medical-Dosimetry Registry of the Personnel of Mayak Production Association: Status and Perspectives	42
V.I. Telnov. Some Demographic Problems of the Population Inhabiting the Nuclear Industry Monotown of Ozyorsk	56

CONTENTS	
S.A. Sypko, V.E. Vvedensky, G.N. Bobov. Physico-Chemical Properties of Submicron ^{239}Pu Aerosols	70
V.V. Vostrotin, A.Yu. Yanov, L.V. Finashov. Results of Scientific Research of Radiation Safety Laboratory No. 6 of Southern Urals Biophysics Institute for 2012–2022	85
3. INFORMATION & PERSONALIA	
Trapeznikov A.V.	94
CONTENTS	95
ABSTRACTS	97
Information about Authors	101

The journal is included in the list of peer-reviewed scientific journals and publications recommended for publication of principal scientific results of Doctoral and Candidate's dissertations.

ABSTRACTS

MAIN RESULTS OF SCIENTIFIC AND PRACTICAL ACTIVITIES OF SOUTHERN URAL BIOPHYSICS INSTITUTE IN THE FIELD OF RADIATION SAFETY

A.V. Yefimov, A.B. Sokolova, K.G. Suslova

FSBIS Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozyorsk, Russia

During the period of existence of Southern Urals Biophysics Institute (SUBI), an enormous amount of information has been accumulated in the field of radiation safety and radiation monitoring of internal exposure through the efforts of the specialists of Laboratory No. 3 of Radiation Safety and Dosimetry Department. Today the unique long-term experience of SUBI Laboratory No. 3 allows both addressing practical tasks of dosimetry monitoring for workers at radiation-hazardous facilities and making a significant contribution to the development of the global scientific knowledge in the sphere of radiation protection and safety.

KEY WORDS: RADIATION SAFETY, DOSIMETRY MONITORING, PLUTONIUM

MONITORING OF RADIATION SITUATION IN THE MAYAK PA RADIATION-CONTROL AREA

Ye.Ye. Aladova, A.I. Aldoshin, L.V. Finashov, V.A. Marov, Ye.V. Romanov

FSBIS Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozyorsk, Russia

The paper presents the results of a regularly conducted gamma-ray survey of the settlements and territories located in the 30-km Mayak PA impact zone, obtained in the period from 2016 to 2021. Materials and methods: by means of a mobile radiological laboratory equipped with a Gamma Sensor dosimetric installation, measurements of the ambient dose equivalent rate (ADER) in settlements and reference points of the routes developed for the territory survey with reference to geographical coordinates were carried out. A regression linear analysis of ADER dependence on the intensity of gamma-ray spectra of identified radionuclides and on the distance from the Mayak PA was carried out. Results: the average annual ADER values were in the range of 0.07 to 0.12 $\mu\text{Sv/h}$, with an average value of 0.09 $\mu\text{Sv/h}$, and corresponded to the natural gamma background radiation inherent in this area. The maximum ADER values exceeding the permissible level of gamma-radiation dose equivalent rate in an open area for the population were recorded when crossing the bridge over the river Techa, into which radioactive waste had been discharged in the initial years of the Mayak PA operation. Such radionuclides as ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K , and ^{137}Cs have been identified in the gamma-ray spectrum with reference to geographical coordinates. It is noted that at the beginning of the spring snowmelt, the main statistically significant contribution to the ADER was made by ^{137}Cs associated with global precipitation, with the number of pulses at the peak of the total absorption of ^{137}Cs moderately correlating with the distance from the Mayak PA. After the beginning of the growing season, there was a noticeable inverse correlation with the distance from the Mayak PA and the number of pulses in the ^{137}Cs channels, which is probably due to the presence of technogenic cesium. Conclusions: the registered ADER values in the surveyed territories were within the range of fluctuations in the natural gamma background radiation characteristic of this area over the past 10 years.

KEYWORDS: RADIATION MONITORING; GAMMA RADIATION DOSE RATE; GAMMA RADIATION SURVEY OF THE AREA; CESIUM; BACKGROUND RADIATION; GAMMA-RAY SPECTRUM; RADIONUCLIDES

RESPONSE TO RADIATION INCIDENTS IN THE AREA OF RESPONSIBILITY OF SOUTHERN URALS REGIONAL EMERGENCY MEDICAL-DOSIMETRIC CENTER OF FMBA OF RUSSIA

Ye.Ye. Aladova, A.V. Yefimov, A.I. Aldoshin, L.L. Khoreshko

FSBIS Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozyorsk, Russia

The necessity of improving the regional system of radiation emergency preparedness and response of FMBA of Russia is caused by the growing international tension and the increasing threat of radiological and nuclear terrorism given the current political situation. Analysis of the radiation events in the area of responsibility of Southern Urals Regional Emergency Medical-Dosimetric Center has demonstrated that radionuclide entry into the human body through wounds predominates in the structure of radiation incidents both at the Mayak PA and in other radiation hazardous facilities. There are cases of inhalation intake, situations that result in exceeding the permissible limits of doses of external radiation exposure, as well as facts of finding orphan sources of ionizing radiation, etc. Incident response experience has demonstrated that experts of the center are successful in implementing the tasks related to assessment of the radiation situation and medical and sanitary consequences, as well as to dosimetric support of individuals involved in the radiological situation. If necessary they also provide expert and analytical support of the local agencies of FMBA of Russia.

KEYWORDS: EMERGENCIES, RADIATION HAZARDOUS SITE, RADIATION INCIDENT, REGIONAL EMERGENCY RESPONSE SYSTEM

GROWTH FACTORS IN INDIVIDUALS EXPOSED TO OCCUPATIONAL CHRONIC IRRADIATION

V.L. Rybkina, D.S. Oslina, T.V. Azizova, G.V. Adamova

FSBIS Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozyorsk, Russia

Ye.D. Drugova

N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

This study is aimed at assessing the level of expression of growth factors in the blood serum of individuals who have undergone prolonged occupational exposure to radiation. Blood samples were examined for the main group represented by the Mayak employees (workers of nuclear industry facilities subjected to occupational chronic radiation exposure and examined after the end of external gamma radiation exposure and under conditions of ongoing internal alpha radiation exposure) and for the control group represented by the residents of Ozyorsk (the city located in the vicinity of the Mayak facilities) who were not exposed to radiation as a result of professional activity. The content of growth factors was determined in peripheral blood by enzyme immunoassay. Levels of PDGF and TGF_{β} in the blood serum were reduced in the main group as compared to the control group. The study revealed a statistically significant inverse linear relationship of TGF_{β} and the total bone marrow absorbed dose of internal α - and external γ -radiation and the individuals' age. The content of VEGF in the blood serum was increased in comparison with the control group and had positive correlation with the total dose of external gamma radiation absorbed in the bone marrow. The revealed changes in expression of the growth factors can play a key role in formation of late health effects.

KEYWORDS: GROWTH FACTORS, ALPHA IRRADIATION, GAMMA IRRADIATION

MEDICAL-DOSIMETRY REGISTRY OF THE PERSONNEL OF MAYAK PRODUCTION ASSOCIATION: STATUS AND PERSPECTIVES

**M.E. Sokolnikov, N.R. Kabirova, P.V. Okatenko, N.A. Koshurnikova, Yu.V. Tsareva,
I.A. Martinenko, Ye.V. Denisova**
FSBIS Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozyorsk, Russia

The paper describes in general the issues of creating and the current status of the Medical-Dosimetry Registry of Mayak PA Workers. The Registry has been established in Southern Urals Biophysics Institute and has been managed by its experts for many years.

The Medical-Dosimetry Registry comprises all the individuals who started their employment at the main Mayak plants (reactor plant, radiochemical plant and chemical-metallurgical plant) as well as at the auxiliary facilities (mechanical and repair plant and water treatment facility) in 1948–2016. The Mayak workers in the course of their occupational activity could be exposed to chronic external gamma radiation as well as to internal radiation from incorporated radionuclides. As of 31.12.2018 the Registry contains information on 36,480 individuals: 27,216 men and 9,264 women (25.4 % of the total number of individuals). Vital status is known for 95.2 % of the individuals. The period of epidemiological follow-up makes more than 70 years. 52.8 % of the individuals with the known vital status are dead. Cause of death is identified for 89 % of cases.

The unique information accumulated in the Registry can be used for assessing the significance of man-made radiation exposure in a wide range of doses of external, internal and combined radiation exposure. A long period of follow-up, reliable precise information on the vital status, cause of death and malignant neoplasms allow obtaining reasonably accurate quantitative assessment of risks of late effects of long-term radiation exposure due to occupational activity. The paper presents perspectives of using the Registry as a means of radiation risk assessment in the course of development of scientifically valid recommendations for improving radiation safety standards.

KEYWORDS: MEDICAL-DOSIMETRY REGISTRY, DATABASE, PERSONNEL, MAYAK PA, RADIATION DOSE, RADIATION EXPOSURE, VITAL STATUS, CAUSES OF DEATH, MALIGNANT NEOPLASMS, RADIATION-INDUCED RISK

SOME DEMOGRAPHIC PROBLEMS OF THE POPULATION INHABITING THE NUCLEAR INDUSTRY MONOTOWN OF OZYORSK

V.I. Telnov
FSBIS Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozyorsk, Russia

The population reproduction assessment is a challenging task faced by demographers in the Russian Federation and its regions. This study is aimed at comparative analysis of the reproduction process among the population of the nuclear industry monotown of Ozyorsk and the Russian Federation. The analysis uses a wide range of indicators (22) of population reproduction including 5 indicators of population size and age-sex pattern, 5 indicators of birthrate, 3 indicators of mortality, 5 indicators of migration and 4 indicators of depopulation and the rate of their change. As a result of a comparative analysis of dynamics of reproduction indicators of Ozyorsk population from 1959 to 2020, it was found that its initial state was more favorable compared to Russia, but since 2002 the reproduction process in Ozyorsk has become more unfavorable due to intensive degradation. The problems of Ozyorsk population reproduction include a more pronounced decrease in the population size, an increase in the proportion of elderly women (so called demographic loneliness of women), an increase in the age pattern index (narrow base and wide top of population pyramid) and its growth rates, a significant decrease in birthrate and an increase in mortality, including elderly population and low migration growth. These changes resulted in negative natural and total growth, higher natural and general depopulation and an increase in its rates, and, finally, in narrowed reproduction and low population stability of Ozyorsk population. The observed unfavorable processes of the Russian population reproduction reflect a number of features of demographic transitions and the second epidemiological revolution caused by social, political and military cataclysms of the 20th century

in the country. In Ozyorsk, these processes are also attributed to limited demographic resources of a small monotown built around one town-forming facility. The paper concludes that demographic monitoring of Ozyorsk population is required. Public and Ozyorsk administration should be subsequently informed of the results.

KEYWORDS: OZYORSK POPULATION, REPRODUCTION, BIRTHRATE, MORTALITY, MIGRATION, POPULATION GROWTH/DECLINE, DEPOPULATION, POPULATION STABILITY

PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SUBMICRON ^{239}Pu AEROSOLS

S.A. Sypko, V.E. Vvedensky, G.N. Bobov

FSBIS Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozyorsk, Russia

The paper provides materials and methods used to analyze physicochemical properties of submicron industrial aerosols. The presented approaches can be used in research centers and facilities, including Rosatom subdivisions, to study physicochemical properties of submicron and nanometer aerosols. Experimental studies of dispersity of industrial alpha-emitting submicron aerosols in the air of the working premises of the Mayak PA were carried out for ^{239}Pu using the neutron-induced measurement method. It is shown that the size distribution of $^{239}\text{PuO}_2$ nanoparticles in the air of the oxalate precipitation department has a Pareto distribution. The result obtained can be used as an a priori size distribution of nanoparticles when calculating the dose load from internal irradiation from ^{239}Pu on the personnel of the oxalate precipitation department at the RT Plant of the Mayak PA using the Bayesian method.

KEYWORDS: PLUTONIUM, AEROSOLS, PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES, DIFFUSION BATTERY, NEUTRON-INDUCED METHOD

RESULTS OF SCIENTIFIC RESEARCH OF RADIATION SAFETY LABORATORY No. 6 OF THE SOUTHERN URALS BIOPHYSICS INSTITUTE FOR 2012–2022

V.V. Vostrotin, A.Yu. Yanov, L.V. Finashov

FSBIS Southern Urals Biophysics Institute of FMBA of Russia, Ozyorsk, Russia

The article contains information about the establishment of Laboratory No. 6 of SUBI and describes the equipment and measurement methods used, the process of interaction with other subdivisions of SUBI and the main areas of the laboratory activity. The results of long-term research related to the Mayak PA personnel, the population of Ozyorsk and the environment, as well as the work on creation and improvement of dosimetry systems DTS-2019 and iDose 2 are presented.

KEYWORDS: TRITIUM, PERSONNEL, POPULATION, RADIOECOLOGY, INTERNAL EXPOSURE

Главный редактор

Мокров Юрий Геннадьевич — доктор технических наук

Заместитель главного редактора

Тананаев Иван Гундарович — доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН

Редакционная коллегия:

Аклеев Александр Васильевич — доктор медицинских наук, профессор
Большаков Владимир Николаевич — доктор биологических наук, профессор, академик РАН
Большов Леонид Александрович — доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН
Величкин Василий Иванович — доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Демченко Елена Александровна — кандидат химических наук
Жуковский Михаил Владимирович — доктор технических наук, профессор
Иванов Иван Александрович — кандидат технических наук
Ильин Леонид Андреевич — доктор медицинских наук, профессор, академик РАН
Калмыков Степан Николаевич — доктор химических наук, профессор, академик РАН
Козлов Павел Васильевич — кандидат технических наук
Колупаев Дмитрий Никифорович — кандидат технических наук
Кошурникова Нина Александровна — доктор медицинских наук, профессор
Крышев Александр Иванович — доктор биологических наук
Куваев Андрей Алексеевич — доктор геолого-минералогических наук, доцент
Линге Игорь Иннокентьевич — доктор технических наук
Логунов Михаил Васильевич — кандидат технических наук
Мясоедов Борис Федорович — доктор химических наук, профессор, академик РАН
Позолотина Вера Николаевна — доктор биологических наук
Пряхин Евгений Александрович — доктор биологических наук, профессор
Романов Сергей Анатольевич — кандидат биологических наук
Сокольников Михаил Эдуардович — доктор медицинских наук
Толстых Евгения Игоревна — доктор биологических наук
Уткин Сергей Сергеевич — доктор технических наук
Хомяков Анатолий Павлович — доктор технических наук
Хохряков Валентин Федорович — доктор биологических наук, профессор
Шишкина Елена Анатольевна — доктор биологических наук
Юдинцев Сергей Владимирович — доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН
Юлдашев Юрий Тахирович — представитель учредителя

Сведения об авторах статей:

Адамова Галина Владимировна	– научный сотрудник
Азизова Тамара Васильевна	– к.мед.н., заведующий клиническим отделом
Аладова Елена Евгеньевна	– к.б.н., ведущий научный сотрудник ЮУРАМДЦ, <i>aladova@subi.su</i>
Алдошин Александр Иванович	– начальник ЮУРАМДЦ
Бобов Георгий Николаевич	– ведущий инженер-химик, <i>Bobov@subi.su</i>
Введенский Владимир Эдуардович	– ведущий программист лаборатории № 2, <i>vvedensky@subi.su</i>
Востротин Вадим Владимирович	– к.б.н., старший научный сотрудник, заведующий лабораторией № 6 отдела дозиметрии и радиационной безопасности, <i>vostrotin@subi.su</i>
Денисова Елена Владимировна	– младший научный сотрудник отдела эпидемиологии, т. (35130) 73076, <i>denisova@subi.su</i>
Другова Елена Дмитриевна	– к.мед.н., старший преподаватель кафедры гигиены
Ефимов Александр Владимирович	– заведующий отделом радиационной безопасности и дозиметрии, т. (35130) 29370, <i>ephimov@subi.su</i>
Кабилова Наиля Равильевна	– научный сотрудник отдела эпидемиологии, т. (35130) 73076, <i>kabirova@subi.su</i>
Кошурникова Нина Александровна	– д.мед.н., главный научный сотрудник отдела эпидемиологии, т. (35130) 73076, <i>koshurnikova@subi.su</i>
Маров Василий Александрович	– ведущий системный администратор ЮУРАМДЦ
Мартиненко Ирина Александровна	– научный сотрудник отдела эпидемиологии, т. (35130) 75629, <i>martinenko@subi.su</i>
Окатенко Павел Викторович	– руководитель группы компьютерного и программного обеспечения отдела эпидемиологии, т. (35130) 76903, <i>okatenko@subi.su</i>
Ослина Дарья Сергеевна	– научный сотрудник
Романов Егор Владимирович	– к.пед.н., и.о. старшего научного сотрудника
Рыбкина Валентина Львовна	– д.мед.н., ведущий научный сотрудник, <i>subi@subi.su</i>
Соколова Александра Борисовна	– научный сотрудник, и.о. руководителя группы программно-информационного обеспечения и поддержки, т. (35130) 29459, <i>sokolova@subi.su</i>

Сокольников Михаил Эдуардович	— д.мед.н., заместитель директора по научной работе, заведующий отделом, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник отдела эпидемиологии, т. (35130) 71652, sokolnikov@subi.su
Суслова Клара Гилимовна	— ведущий научный сотрудник, т. (35130) 29459, suslova@subi.su
Сыпко Сергей Алексеевич	— заведующий лабораторией, научный сотрудник, sypko@subi.su
Тельнов Виталий Иванович	— к.мед.н., доцент по специальности, ведущий научный сотрудник клинического отдела, региональный представитель Научного совета МГУ по проблеме "Народонаселение и устойчивое развитие", tvi@subi.su
Финашов Леонид Викторович	— научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности
Хорешко Леонид Леонидович	— заместитель начальника ЮУРАМДЦ, llkhoresko@subi.su
Царева Юлия Вячеславовна	— к.мед.н., старший научный сотрудник отдела эпидемиологии, т. (35130) 75629, tsareva@subi.su
Янов Александр Юрьевич	— к.б.н., научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, yanov@subi.su

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Федерального государственного унитарного предприятия
"ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "МАЯК"
ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
№ 3 (111) 2023

Технический редактор И.Н. Моисеева
Переводчики: О.А. Константинова, Д.Ю. Сезонова
Корректоры: О.А. Константинова, Д.Ю. Сезонова, Н.П. Подольская, Е.В. Лупеха

ПОДПИСКА – 2024

**С октября 2023 г. на сайте "Почта России" проводится
подписная кампания на январь - июнь 2024 года
по электронному каталогу.**

ЖУРНАЛ
"Вопросы радиационной безопасности"
основной индекс ПН083.

Учредитель: Федеральное государственное унитарное предприятие "Производственное объединение "Маяк"
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-21316 от 22 июня 2005 г. выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Адрес издателя: Россия, 456780, Челябинская обл., г. Озёрск, ул. Ленина, 31
Адрес редакции: Россия, 456780, Челябинская обл., г. Озёрск, ул. Ермолаева, 18
Тел. (35130) 33081; e-mail: vrb@cpl.po-mayak.ru
Address: 18, Ermolayev st., Ozyorsk, 456780, Russia
Tel. (35130) 33081; e-mail: vrb@cpl.po-mayak.ru

Подписано в печать 22.09.2023
Выход в свет 29.09.2023

Тираж 90 экз.
Цена договорная

Отпечатано в полиграфическом участке ФГУП "ПО "Маяк"
Россия, 456780, Челябинская обл., г. Озёрск, ул. Ленина, 40