

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
№ 1 (109) 2023 г.

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.В. Аклеев, 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. Мясоедов, В.Н. Позолотина,
Е.А. Пряхин, С.А. Романов, М.Э. Сокольников, Е.И. Толстых, А.В. Трапезников,
С.С. Уткин, А.П. Хомяков, В.Ф. Хохряков, Е.А. Шишкина, С.В. Юдинцев

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Мелихова Е.М. МКРЗ готовит очередную ревизию системы радиационной защиты 3

2. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Кузнецова Н.А., Орлова И.А., Сахненко О.А. Приоритет безопасности атомной
отрасли – использование качественных средств индивидуальной защиты 9

3. РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ И ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

Мокров Ю.Г. Изучение параметров источника поступления радионуклидов
активационного происхождения в реку Течу 14

Городецкий В.Г., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В.
Сравнительная оценка дозовых нагрузок на ихтиофауну Обь-Иртышской речной
системы и Белоярского водохранилища – водоёма-охладителя Белоярской АЭС 30

4. ОБЛУЧЕНИЕ И ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

Атаманюк Н.И., Стяжкина Е.В., Перетыкин А.А., Обвинцева Н.А., Андреев С.С.,
Алдибекова А.Е., Тряпицына Г.А., Пряхин Е.А. Экспериментальная модель для оценки
персонифицированной реакции ГСК человека на ионизирующее излучение in vivo 40

Банникова М.В., Рыбкина В.Л., Азизова Т.В., Григорьева Е.С. Заболеваемость
немеланомным раком кожи у работников, подвергшихся профессиональному
хроническому облучению 52

СОДЕРЖАНИЕ

Царева Ю.В., Окатенко П.В. Структура смертности населения г. Озёрска за период 1948–2013 гг. 60

Брагин Е.В., Банникова М.В., Азизова Т.В., Коробкин А.В.
Показатели заболеваемости железодефицитными анемиями у лиц, подвергшихся профессиональному хроническому облучению 67

5. ИНФОРМАЦИЯ И ПЕРСОНАЛИИ

Ильину Леониду Андреевичу – 95 лет 78

К 120-летию И.В. Курчатова и А.П. Александрова 81

Новые книги 85

CONTENTS 87

ABSTRACTS 89

Сведения об авторах статей 93

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.

УДК 621.039.009

© 2023

МКРЗ ГОТОВИТ ОЧЕРЕДНУЮ РЕВИЗИЮ СИСТЕМЫ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

*Е.М. Мелихова**Россия, г. Москва, Институт проблем безопасного развития
атомной энергетики РАН*

В 2021 г. МКРЗ заявила о необходимости ревизии общих рекомендаций 2007 года и представила программу будущих работ. В статье коротко рассматриваются основные направления ревизии научного фундамента действующей системы радиационной защиты и новые социально-гуманитарные подходы к повышению эффективности её практического применения. В заключение обсуждаются причины долговременной стагнации российской нормативно-правовой базы в области обеспечения радиационной безопасности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: МКРЗ, СИСТЕМА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ, НАУЧНЫЕ ОСНОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ, ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТЫ, ЭТИКА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ, ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН О РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ

Летом 2021 г. МКРЗ опубликовала меморандум [1] о намерении провести в ближайшее десятилетие ревизию общих рекомендаций 2007 года, изложенных в Публикации 103 [2]. Комиссия планирует адаптировать успешно работающую систему радиационной защиты (СРЗ) к изменившимся условиям с учётом накопленных за 14 лет научных знаний и расширения сферы применения ионизирующего излучения. В новые рекомендации будут интегрированы подходы и результаты, представленные в публикациях, вышедших после 2008 г., а также результаты будущей работы.

В 2018 г. МКРЗ продекларировала, что в основании СРЗ лежат три столпа: наука, этика и практика защиты [3]. Соответственно, в меморандуме помимо уточнения и актуализации научной составляющей защиты поставлена еще одна цель – повысить эффективность применения СРЗ за счёт прояснения её этических оснований и улучшения понимания заинтересованными сторонами.

К работам по анализу и уточнению общих рекомендаций Комиссия планирует привлекать специалистов разных стран и международных организаций. Программа работ и необходимые ресурсы обсуждались на прошедшем в ноябре 2022 г. VI международном симпозиуме

"Система радиационной защиты – новое поколение".

Здесь мы кратко рассмотрим основные научные элементы системы, которые будут анализироваться и, возможно, пересматриваться в ходе ревизии, а также планы работ по социально-гуманитарным направлениям.

РЕВИЗИЯ НАУЧНЫХ ОСНОВАНИЙ

Ревизия естественно-научных основ будет проводиться по двум направлениям: защита человека и защита окружающей среды.

В части *защиты человека* МКРЗ планирует более чётко определить разницу между тканевыми реакциями и стохастическими последствиями. Предотвращение тканевых реакций остаётся актуальной задачей, но с оговоркой, что такие реакции могут быть приемлемыми, если получаемая выгода перевешивает вред. Например, при радиотерапии, спасении людей в случае тяжёлой радиационной аварии, освоении дальнего космоса усиленное медицинское наблюдение будет предпочтительнее обязательного требования предотвращать тканевые реакции. В отношении стохастических последствий ставится задача развития концепции радиационного ущерба, впервые

предложенной в Публикации 60 (МКРЗ, 1991).

В новые рекомендации планируется интегрировать систематизированный в Публикации 147 (МКРЗ, 2021) подход к использованию основных дозиметрических величин (поглощённая и эквивалентная дозы используются в задачах защиты органов и тканей; эффективная доза – в задачах защиты от стохастических последствий при малых дозах <100 мГр и малых мощностях дозы <5 мГр/ч).

Комиссия предлагает также подумать о возможности расширенной трактовки задачи защиты здоровья человека, ориентированной на ВОЗовское определение здоровья как состояния полного физического, душевного и социального благополучия.

Не вдаваясь в подробности, можно сказать, что в части защиты человека Комиссия ставит задачу совершенствования действующих подходов; что касается защиты окружающей среды, эта часть будет развиваться, в том числе за счёт расширения предметной области.

В Публикации 103 задача радиационной защиты окружающей среды сформулирована в общем виде: "предотвращение или снижение частоты пагубных эффектов излучения до такого уровня, при котором они будут оказывать пренебрежимо малое воздействие на поддержание видового многообразия, сохранения видов, здоровье и состояние естественной среды обитания, общностей и экосистем". За прошедшие годы определены характеристики объекта защиты (создана база данных для 12 референтных видов животных и растений), сценарии облучения, зависимости доза-эффект, производные референтные уровни для возможного проявления негативных последствий облучения для каждого из 12 видов и т. д. Комиссия ставит задачу в следующем десятилетии изучить возможность применения методологии, используемой для природных систем и организмов, для экосистем, созданных и управляемых человеком, домашних видов и пациентов ветеринарных клиник. Предлагается также подумать о расширении задач защиты природной среды на базе концепций устойчивого развития, качества жизни и т. д.

Переходя к планам Комиссии по работе над базовыми принципами защиты, отметим её новый междисциплинарный подход.

Основные принципы будут уточняться в свете этических категорий, представленных в Публикации 138 (МКРЗ, 2018). Комиссия планирует рассмотреть проблемы практической реализации, связанные со значительным усложнением медицинской помощи, широким распространением технологий сканирования, возросшими ожиданиями пациентов, их участием в принятии решений, а также с применением искусственного интеллекта и биомедицинскими исследованиями с использованием радиации вне клинической практики.

При раскрытии принципа обоснования¹ Комиссия предлагает указать, что при обосновании многих решений, имеющих отношение к ситуации существующего облучения, необходимо принимать во внимание качество жизни людей.

В отношении принципа оптимизации² ставится задача определения всех существенных факторов, влияющих на выбор "разумно достижимого" низкого уровня облучения, и разъяснения процессов балансировки этих факторов. К ранее обозначенным факторам (дозы, риски, экономические и социальные соображения) предлагается добавить экологическое и общее благополучие. Холистический подход к изложению принципа оптимизации, по мнению Комиссии, позволит расширить сферу его применения, включив в неё анализ безопасности источников, объектов и практик. Кроме того, предлагается подумать, как поощрять разумную предосторожность, избегая неоправданного консерватизма. Обговаривается возможность подготовки Комиссией руководства по принятию решений при облучении очень малыми дозами (в пределах обычных колебаний природного фона), а также в случаях, когда вероятность облучения и оценка результирующего риска малы, а уровень

¹ Принцип обоснования: любое решение, изменяющее условия получения облучения, должно приносить больше пользы, чем вреда.

² Принцип оптимизации: вероятность облучения, число облучаемых людей и величины индивидуальных доз их облучения должны быть настолько низкими, насколько это разумно достижимо с учётом экономических и социальных факторов (Публикация 103, МКРЗ, 2007).

облучения может быть значительным.

Принцип нормирования планируется представить в более общем виде как этический императив защищать каждого в любых ситуациях облучения, а не только в ситуациях планового облучения. Тогда все три фундаментальных принципа – обоснования, оптимизации и нормирования – будут применимы ко всем ситуациям и категориям облучения. В этом случае потребуются уточнить различия в понятиях дозовых пределов, граничных доз и референтных уровней и областей их применения.

Категории облучения также планируется прояснить и обобщить. К медицинскому, профессиональному облучению и облучению населения могут быть добавлены новые категории: облучение аварийных рабочих и облучение биоты.

Ситуации облучения, границы их применения и переходы между ними также будут уточняться. Возможно, будет добавлена ситуация потенциального облучения, которая имеет место, например, при захоронении РАО. Для полноты охвата категорий и ситуаций облучения Комиссия предлагает обратить внимание на облучение от природных источников, модифицированное деятельностью человека (космическое облучение при авиаперелётах и полётах за пределы околоземной орбиты, облучение от радона в энергоэффективных домах и др.).

В части дозиметрии основные направления работы включают более чёткое определение понятий, упрощение их использования, персонификацию дозовых нагрузок, уточнение дозовых коэффициентов, обобщение на разные категории и ситуации облучения человека и биоты и т. д.

В части эффектов и рисков планируется более чёткая их классификация, уточнение и более полное обоснование различных дозовых пределов, актуализация экспериментальных свидетельств в пользу сохранения линейной беспороговой модели в качестве основы для оценки рисков, развитие методологии оценки радиационного ущерба и т. д.

Обобщая, можно сказать, что развитие естественно-научной составляющей СРЗ в ближайшие десятилетия пойдёт по пути расширения и уточнения уже сформулированных

теорий, понятий и принципов. Развёрнутый перечень приоритетных естественно-научных исследований в поддержку СРЗ на краткосрочную, среднесрочную и отдалённую перспективу представлен в [4].

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТЫ

С целью повышения эффективности применения СРЗ Комиссия предлагает сделать новые рекомендации более понятными для заинтересованных сторон. Это потребует, во-первых, прояснения этических оснований системы, во-вторых, более чёткого, ясного и последовательного изложения общих рекомендаций, в-третьих, определения эффективных механизмов взаимодействия и коммуникации экспертов с заинтересованными сторонами.

По первой задаче предлагается определить те аспекты системы, где явное обсуждение этических оснований в дополнение к научным соображениям может принести реальную пользу. По второй задаче Комиссия будет работать над тем, чтобы язык стал более понятным для неспециалистов. Ясность изложения будет повышаться также за счёт разумного упрощения системы, с оговоркой, что она должна оставаться настолько сложной, насколько это необходимо, чтобы охватывать весь спектр возможных ситуаций, применений и сценариев.

Третья задача, касающаяся взаимодействия и коммуникаций с заинтересованными сторонами, очерчена в меморандуме довольно расплывчато. В 2020 г. в Публикации 146 Комиссия ввела новое понятие "ко-экспертизы" и определила его как процесс взаимодействия между экспертами, профессионалами и заинтересованными сторонами с целью оценки и лучшего понимания радиационной ситуации, выработки защитных мер для населения и окружающей среды, улучшения условий жизни и работы людей. В меморандуме Комиссия выразила надежду, что "уточнение этических рамок и процесса ко-экспертизы могут привести к выработке более конкретных рекомендаций по вовлечению заинтересованных сторон и коммуникации, особенно при оптимизации защиты в случае спорных объектов и видов деятельности, в медицинской практике, при управлении

авариями и реабилитации территорий" [1].

Помимо этих трёх задач планируется повышать качество образования и профессиональной подготовки специалистов по радиационной защите и преподавателей соответствующих дисциплин, проводить их аккредитацию в течение всей профессиональной карьеры.

Список приоритетных научных исследований по социально-гуманитарному направлению также можно найти в [4].

Подводя итог, можно сказать, что планы работ по гуманитарному направлению имеют довольно общий характер, и Комиссия особенно рассчитывает на помощь экспертного сообщества.

ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ НОРМАТИВНО- ПРАВОВОЙ БАЗЫ

В связи с планами МКРЗ по подготовке новых общих рекомендаций уместно посмотреть, в каком состоянии находится российская нормативная база в области радиационной безопасности.

Для отечественной системы предстоящая ревизия Публикации 103 представляет скорее академический, нежели практический интерес.

Ведущие отечественные учёные и специалисты в этой области хорошо знакомы с публикациями МКРЗ и её дальнейшими планами, российские представители есть в основном составе Комиссии и в рабочих группах. Проблемы гармонизации отечественной нормативно-правовой базы с международно-принятыми подходами неизменно обсуждаются на тематических научных конференциях и в научной периодике [5–14]. Но на практике эта задача пока не решается.

Действующая нормативно-правовая база основана на Публикации 60 МКРЗ (1990 г.) и стандартах МАГАТЭ 1996–1997 гг. Долгосрочная стагнация в этой сфере во многом связана с унаследованным от Чернобыля Федеральным законом №3-ФЗ "О радиационной безопасности населения" (ФЗ РБН). Этот закон не отвечает целям государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности, но отказаться от него пока не получается.

Вопрос о внесении изменений в ФЗ РБН рассматривается давно и на разных уровнях, в том числе на Парламентских слушаниях, заседаниях Российской Научной комиссии по радиационной защите, Межведомственной комиссии по экологической безопасности Совета Безопасности РФ и др. С 2019 г. подготовка предложений по изменению ФЗ РБН ведётся в рамках работ по реализации "Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу". Этим занимаются Роспотребнадзор и Росатом, но до недавнего времени их подходы к изменению ФЗ РБН сильно отличались.

Специалисты Роспотребнадзора утверждали, что действующая нормативно-правовая база надёжно обеспечивает радиационную безопасность персонала и населения, поэтому достаточно лишь её гармонизации с новыми положениями международных рекомендаций и стандартов. В 2020 г. Роспотребнадзор подготовил проект изменений чисто "эволюционного" характера.

По мнению экспертов Росатома, Ростехнадзора, РАН и ФМБА России, закон о радиационной безопасности населения должен соответствовать не только международным подходам, но и российскому законодательству в области использования атомной энергии. Соответственно, Росатом предлагает либо переработать закон коренным образом, либо, что более рационально, упразднить его и разработать новый [5–9].

В сентябре 2021 г. после острой дискуссии Роспотребнадзор согласился с необходимостью разработки нового закона "О радиационной безопасности в Российской Федерации", после чего Госкорпорация предложила Правительству включить задание на разработку нового закона в План реализации "Основ государственной политики ...". Но эта идея не получила поддержки, и летом 2022 г. Роспотребнадзор представил в Правительство свой доработанный "эволюционный" вариант, содержащий только самые необходимые изменения [10]. Как будут развиваться события дальше, покажет время.

Нерешённость вопроса ФЗ РБН препятствует актуализации и гармонизации норм радиационной безопасности (НРБ-99/2009 и

ОСПОРБ-99/2010). В 2018 году был прецедент, когда Росатом отклонил подготовленный Роспотребнадзором проект НРБ-2019, как не соответствующий российскому законодательству в области использования атомной энергии.

Проблемы есть не только в части защиты человека. На повестке дня давно стоит вопрос о развитии отечественных нормативных документов в части радиационной защиты окружающей среды, их увязке с федеральным законодательством, международными нормами ОНБ-2011 и действующими рекомендациями МКРЗ [12–14]. Таким образом, основная работа по совершенствованию отечественной нормативной базы пока ещё впереди.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По мнению МКРЗ, подготовка новых общих рекомендаций займёт не менее десяти лет. Комиссия надеется создать единый внутренний непротиворечивый документ, отражающий опубликованные после 2007 года обновления, а также основные результаты из её будущих публикаций. Можно надеяться, что к этому времени российская система радиационной защиты преодолеет отрицательный правовой опыт Чернобыля и будет полностью готова к дальнейшему совершенствованию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Clement C., Rühm W., Harrison J. et al. Keeping the ICRP recommendations fit for purpose // *J. Radiol. Prot.* – 2021. – V. 41. – P. 1390–1409.
2. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) / Под общей ред. Киселёва М.Ф. и Шандалы Н.К. – Пер. с англ. – М.: Изд-во ООО ПКФ "Алана", 2009. – 344 с.
3. ICRP 2018. Ethical foundations of the system of radiological protection / ICRP Publication 138 Ann. – 56 p.
4. Laurier D., Rühm W., Paquet F. et al. Areas of research to support the system of radiological protection // *Radiation and Environmental Biophysics.* – 2021. – V. 60. – P. 519–530.
5. Ведерникова М.В., Линге И.И., Панченко С.В., Стрижова С.В., Супатаева О.А., Уткин С.С. Актуальные вопросы внесения измене-

ний в Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ "О радиационной безопасности населения": Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2020-03. – М.: ИБРАЭ РАН, 2020. – 22 с. – URL: <http://www.ibrae.ac.ru/pubtext/358/> (дата обращения 08.12.2022).

6. Шинкарёв С.М., Кочетков О.А., Ключков В.Н., Барчуков В.Г. К дискуссии о внесении изменений в Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ "О радиационной безопасности населения" // *Мед. радиология и радиационная безопасность.* – 2020. – Т. 65. – № 3. – С. 77–78. – DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-77-78.

7. Кочетков О.А., Ключков В.Н., Самойлов А.С., Шандала Н.К. Гармонизация законодательных актов Российской Федерации с современными международными рекомендациями // *Мед. радиология и радиационная безопасность.* – 2021. – Т. 66. – № 6. – С. 111–115. – DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-6-111-115.

8. Линге И.И. Ключевые вопросы научного обеспечения радиационной безопасности ядерных технологий / В кн. материалов XI Российской научной конференции "Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях". Москва, 26–29 октября 2021 г. – Т. 1. Пленарное заседание. – С. 54–68. – URL: <https://фцп-ярб.рф/about/conf2020/> (дата обращения 08.12.2022)

9. Бочаров К.Г. Вопросы гармонизации законодательства и нормативных правовых актов Российской Федерации с учётом совершенствования международных требований и требований законодательства Российской Федерации в области радиационной безопасности / В кн. материалов XI Российской научной конференции "Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях". Москва, 26–29 октября 2021 г. – Т. 2. Материалы секции № 1 "Радиационная безопасность". – С. 57–63. – URL: <https://фцп-ярб.рф/about/conf2020/> (дата обращения 08.12.2022)

10. Романович И.К., Водоватов А.В., Библин А.М., Кормановская Т.А. К проблеме совершенствования законодательного и нормативного обеспечения радиационной безопасности населения // *Радиационная гигиена.* – 2022. – Т. 15. – № 1. – С. 88–95. – DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-1-88-95.

11. Информация о работе над проектом ФЗ. Электронный документ ФБУН НИИРГ им. П.В. Рамзаева. – URL: http://www.niirg.ru/FZ_2022.htm (дата обращения 08.12.2022).
12. Крышев И. И., Сазыкина Т. Г. Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно-методических документов с учётом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 // Радиация и риск (Бюллетень НРЭР). – 2013. – № 1. – С. 47–61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/radiatsionnaya-bezopasnost-okruzhayuschey-sredy-neobhodimost-garmonizatsii-rossiyskikh-i-mezhdunarodnyh-normativno-metodicheskikh> (дата обращения: 02.12.2022).
13. Панченко С.В. Глава 6. Некоторые проблемные вопросы отечественного нормирования / В кн. "Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту" / Под общ. ред. Линге И.И. и Крышева И.И. – 2015. – 265 с. – URL: http://www.ibrae.ac.ru/docs/публикации/Книга_Практические%20рекомендации.pdf (дата обращения 08.12.2022).
14. Панов А.В., Санжарова Н.И., Переволоцкий А.Н. и др. Анализ национальной системы нормативного и правового обеспечения радиационной безопасности населения и охраны окружающей среды вблизи объектов и территорий, загрязнённых техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности // Радиация и риск. – 2017. – Т. 26. – № 2. – С. 107–121. – DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-2-107-121.

УДК 613.169.16

© 2023

**ПРИОРИТЕТ БЕЗОПАСНОСТИ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ –
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ СРЕДСТВ
ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ**

*Н.А. Кузнецова, И.А. Орлова, О.А. Сахненко
Россия, г. Озёрск, ФГУП "ПО "Маяк"*

Представлена информация о деятельности испытательной лаборатории радионуклидной продукции ФГУП "ПО "Маяк", рассмотрены основные методы сертификационных испытаний средств индивидуальной защиты в соответствии с областью аккредитации. Представлен порядок испытаний опытных образцов средств индивидуальной защиты и дерматологических средств в условиях отсутствия у продукции сертификата соответствия в области использования атомной энергии. Отмечено, что одним из направлений деятельности лаборатории является участие персонала в разработке и пересмотре государственных стандартов, касающихся методов испытаний средств индивидуальной защиты для сертификации в области использования атомной энергии. Сотрудники испытательной лаборатории входят в рабочую группу при головной организации по стандартизации. Деятельность лаборатории позволяет найти правильные подходы к оценке и сертификации качественных СИЗ, а также исключить применение продукции недобросовестных производителей на предприятиях Госкорпорации "Росатом".

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СРЕДСТВА ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ, СЕРТИФИКАЦИЯ ПРОДУКЦИИ, ДЕРМАТОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ, ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ

Термин "культура безопасности" впервые был использован в 1986 г. в "Итоговом докладе о совещании по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле", подготовленным Международной консультативной группой по ядерной безопасности (INSAG), созданной при Генеральном директоре МАГАТЭ. Консультативная группа пришла к выводу, что коренные причины аварии в Чернобыле кроются в человеческом факторе и на всех действующих АЭС необходимо создать и поддерживать "культуру ядерной безопасности" в сочетании с необходимыми мерами по укреплению дисциплины.

Для создания "культуры безопасности" предлагалось направить усилия МАГАТЭ на содействие обмену опытом, на разработку дополнительных рекомендаций, включая предотвращение серьёзных аварий, и на предоставление помощи действующим АЭС в вопросах аттестации, обучения и подготовки операторов. В настоящее время понятие "культура

безопасности" значительно расширилось.

Так, спустя практически 35 лет приказом Госкорпорации "Росатом" от 19.07.2021 № 1/884-П утверждена "Единая отраслевая политика культуры безопасности Госкорпорации "Росатом" и её организаций", целями которой, помимо технологической безопасности, "... является формирование и развитие таких особенностей деятельности организаций и поведения каждого работника, которые направлены на обеспечение приемлемого уровня безопасности, защиту людей и окружающей среды от вредного воздействия производственных факторов".

Применение СИЗ работниками Госкорпорации "Росатом" является неотъемлемой частью культуры безопасности. Обязательная сертификация СИЗ, предусмотренная статьёй 221 ТК РФ, осуществляется органами по сертификации на основании испытаний, проводимых аккредитованными испытательными центрами и лабораториями.

Порядок сертификации СИЗ определяется Техническим регламентом Таможенного союза "О безопасности средств индивидуальной защиты" ТР ТС 019/2011. Однако в этом документе определён лишь минимально необходимый объём требований по обеспечению безопасности, что не в полной мере обеспечивает защиту персонала от вредных (опасных) факторов, характерных для отрасли. Необходимость создания органов по сертификации СИЗ для предприятий Госкорпорации "Росатом" и испытательных лабораторий (центров), способных проводить специфичные сертификационные испытания, была очевидна.

До недавнего времени (в период 2015–2018 гг.) центр им. Бурназяна был единственной аккредитованной испытательной лабораторией в Госкорпорации "Росатом". В настоящее время на территории РФ функционируют три органа по сертификации СИЗ для Госкорпорации "Росатом" ("Русский регистр", ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна и АО "ЭНИЦ").

Для поступательного внедрения новых средств индивидуальной защиты на предприятиях Госкорпорации "Росатом" необходимо было избегать исключительных прав одной организации. Создание конкуренции в области испытательных лабораторий приводит к расширению прав производителей СИЗ и позволяет сбалансировать рынок по качеству и цене, предлагаемой к за купу на предприятия Госкорпорации "Росатом" продукции. В связи с этим в 2019 г. совместно с Департаментом технического регулирования было принято решение о создании на ФГУП "ПО "Маяк" центра для испытаний средств индивидуальной защиты (далее – СИЗ).

На предприятии к тому времени уже существовало несколько испытательных лабораторий с различными областями аккредитации:

- служба радиационного контроля;
- ядерные материалы;
- испытания радионуклидных источников;
- промышленные выбросы в атмосферу и др.

Лишь одна из них – испытательная лаборатория радионуклидной продукции – была аккредитована в системе Госкорпорации "Росатом".

В сентябре 2020 г. испытательная лаборатория радионуклидной продукции ФГУП "ПО

"Маяк" расширила область аккредитации в части испытаний средств индивидуальной защиты и получила переоформленный аттестат аккредитации. В феврале 2022 г. лаборатория также успешно прошла очередное расширение области аккредитации. В настоящее время в испытательной лаборатории организованы и проводятся сертификационные испытания СИЗ на определение:

- коэффициента дезактивации СИЗ;
- дезактивируемости СИЗ от β -загрязнения;
- разрывной нагрузки СИЗ;
- сопротивления раздиру;
- усадки СИЗ;
- устойчивости СИЗ к дезактивации;
- коэффициента защиты СИЗ от β - и мягкого фотонного излучения;
- устойчивости маркировки СИЗ;
- стойкости СИЗ к воздействию агрессивных сред и др.

С учётом различных видов СИЗ (основных и дополнительных) общее количество определяемых показателей на сегодняшний день составляет 27.

За столь короткий период существования (в части испытаний СИЗ) испытательная лаборатория успешно прошла процедуры инспекционного контроля и расширения области аккредитации. За два года было реализовано 23 программы сертификационных испытаний. Основные производители СИЗ: хлопчатобумажных комбинезонов, дополнительных СИЗ и ПВХ, спецобуви – получили сертификаты соответствия в области использования атомной энергии.

Хотим отметить, что за последние три года аккредитацию в Госкорпорации "Росатом" получили ещё пять лабораторий:

- АО "КазХимНИИ";
- ФГУП "ИвНИИПИК ФСБ России";
- ООО "ПРОММАШ ТЕСТ";
- ФГБУ ГНЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России;
- АО "РИТВЕРЦ".

Помимо работы по проведению сертификационных испытаний испытательная лаборатория ФГУП "ПО "Маяк" обеспечила возможность производителям СИЗ проверить свою продукцию в реальных условиях

радиохимического и химико-металлургического производств. В 2019 г. нами разработано "Положение о порядке испытаний опытных образцов средств индивидуальной защиты". Этот документ устанавливает порядок проведения испытаний опытных образцов средств индивидуальной защиты и дерматологических средств индивидуальной защиты как временную меру в условиях отсутствия у большинства производителей средств индивидуальной защиты сертификата соответствия своей продукции требованиям безопасности в области использования атомной энергии и сертификата соответствия пункту 4.5 технического регламента Таможенного Союза ТР ТС 019/201 "О безопасности средств индивидуальной защиты".

Испытаниям подлежат специальная одежда, специальная обувь, средства индивидуальной защиты рук, смывающие и (или) обезвреживающие средства.

Основными целями испытаний опытных образцов средств индивидуальной защиты и дерматологических средств индивидуальной защиты являются:

- оценка эффективности использования в реальных производственных условиях ФГУП "ПО "Маяк";
- оценка принципиальной возможности закупки ФГУП "ПО "Маяк" промышленных партий новых средств индивидуальной защиты и дерматологических средств индивидуальной защиты.

Начиная с 2018 г. на ФГУП "ПО "Маяк" периодически поступают коммерческие предложения от различных производителей СИЗ об использовании своей продукции в подразделениях предприятия. Коротко остановимся на результатах опытных носок продукции ряда поставщиков и производителей СИЗ.

Так, например, нашими сотрудниками были испытаны костюмы из молескина с повышенными физико-механическими характеристиками от ЗАО "Восток-Сервис-Спецодежда". Провели определение следующих параметров: коэффициента дезактивации, дезактивируемости до контрольных уровней, усадки материала после пяти циклов штатной дезактивации, разрывной нагрузки исходной ткани и ткани после пяти циклов дезактивации. По всем показателям были по-

лучены удовлетворительные результаты.

В 2019 г. была получена партия чехлов производства ООО "ИнТрейд" (г. Санкт-Петербург) для дополнительной защиты спецобуви при проведении радиационно опасных работ и работ с агрессивными веществами. Были проведены работы по оценке защитного действия дополнительных СИЗ и их возможности дезактивации (т.е. многократного использования) в условиях химико-металлургического завода на ФГУП "ПО "Маяк".

В результате проведенных испытаний установлено:

- чехлы марки BTR™ компании "ИнТрейд" эффективны для защиты основной спецобуви персонала от воздействия агрессивных сред, жидких радиоактивных растворов, аэрозолей и иных механических загрязнений;
- защитные чехлы с исходным уровнем радиоактивного загрязнения не более 2000 α -част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$) возможно дезактивировать до требуемых контрольных уровней как с применением ТМС "Выбор-1М", так и по штатному режиму, предназначенному для стирки лавсановой спецобуви;
- чехлы марки BTR™ показали высокие эксплуатационные свойства, многократность использования составила не менее пяти циклов "загрязнение-дезактивация";
- текстильный материал защитных чехлов марки BTR™ химически стоек.

В целом защитные бахилы марок BTR™ компании "ИнТрейд" (рис. 1) были рекомендованы к использованию в подразделениях ФГУП "ПО "Маяк".

Аналогичные испытания были проведены с СИЗ компании DUPONT™ в условиях радиохимического и химико-металлургического производств. Объектами испытаний являлись одноразовые защитные чехлы на обувь, халаты, фартуки, нарукавники, комбинезоны. Результаты носок показали, что дополнительные СИЗ марки Tychem6000F и Tychem4000S компании DUPONT™ обладают высокой степенью защиты основных СИЗ от радиоактивного загрязнения:

- по исходному α -загрязнению уровни составляли до 8000 α -част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$);
- по исходному β -загрязнению уровни составляли от 20000 β -част./($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$) и более.

В 2020 г. были проведены работы по оценке защитных свойств дополнительных СИЗ производства ООО "Дельта Плюс С.Е.И." (рис. 2) в условиях радиохимического производства.

В результате проведённых испытаний установлено, что дополнительные СИЗ: ком-



Рис. 1. Защитные бахилы марок BTR™ компании "ИнТрейд"

бинезон защитный белого цвета модификации DELTATEK®5000, сапоги-бахилы жёлтого цвета модификации DELTACHEM, комбинезон защитный жёлтого цвета модификации DELTACHEM обладают высокой степенью защиты основных СИЗ от радиоактивного α - и β -загрязнения.

Кроме СИЗ в 2020–2021 гг. оценили также дезактивирующие способности дерматологических средств (рис. 3), предназначенных для очистки кожных покровов препаратами:

– "Барьер-2" (торговая марка "Барьер", Москва);

– "PRIMATERRA" (ООО "Кристалл-косметик" по заказу "Приматерра", г. Люберцы);

– "Алиранта" (ООО "Алиранта", Москва).

Большинство из них показали удовлетворительные результаты. Однако следует отметить, что все вышеперечисленные СИЗ и ДСИЗ, несмотря на свою эффективность, не имеют сертификатов соответствия требованиям безопасности в области использования атомной энергии, что, в свою очередь, ограничивает их применение на предприятиях атомной отрасли.

Ещё одним важным направлением в деятельности лаборатории является участие персонала в разработке и пересмотре государственных стандартов, касающихся методов испытаний средств индивидуальной защиты для сертификации в области ОИАЭ. Сотрудники испытательной лаборатории входят в рабочую группу при головной организации по стан-



Рис. 2. Дополнительные СИЗ производства ООО "Дельта Плюс С.Е.И."



Рис. 3. Дерматологические средства, предназначенных для очистки кожных покровов

дартизации, которой является АО "Концерн Росэнергоатом", а ФГУП "ПО "Маяк" является организацией методической поддержки ГОС СИЗ.

При проведении испытаний лаборатория столкнулась с рядом проблем, связанных с ошибками в ГОСТах, отсутствием описания процедуры проведения тех или иных испытаний и требований к продукции. Разработка новых и пересмотр действующих стандартов является одной из первоочередных и важных задач. В настоящее время ведётся работа по

определению ключевых показателей для подтверждения соответствия продукции (СИЗ и материалов для СИЗ) для целей сертификации в области использования атомной энергии. Совместные результаты работы с АО "Концерн Росэнергоатом", с органами по сертификации и другими испытательными лабораториями позволят найти правильные подходы к оценке и сертификации качественных СИЗ, а также исключить применение продукции недобросовестных производителей на предприятиях Госкорпорации "Росатом".

УДК 621.039.553.5+502.55

© 2023

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ АКТИВАЦИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В РЕКУ ТЕЧУ

*Ю.Г. Мокров**Россия, г. Озёрск, ФГУП "ПО "Маяк"*

В 1950-е годы водоём В-2 (оз. Кызыл-Таш) использовался для охлаждения промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР). За время прохождения воды через активную зону ПУГР в ней образовывались и накапливались радионуклиды активационного происхождения (РАП) за счёт ядерных реакций при взаимодействии реакторных нейтронов с ядрами химических элементов, содержащихся в воде. Удельная активность (УА) РАП в воде водоёма В-2 зависит от концентрации химических элементов в водоёме. Собраны и проанализированы данные о содержании 16 химических элементов в воде водоёма В-2 за период 1948–1956 гг. с учётом их характерного природного содержания в воде Иртышско-Каслинской системы озёр и с учётом дополнительного техногенного загрязнения водоёма в процессе его эксплуатации. Показано, что основным источником поступления РАП из водоёма В-2 в р. Течу являлся контролируемый сброс воды через открытые шандоры плотины П-2 (или нерегулируемое просачивание воды через закрытые шандоры). Предложена математическая модель и выполнены расчёты УА воды водоёма В-2 для 16 химических элементов и 31 ядерной реакции, в результате которых образуются 20 РАП. Модель верифицирована на основе архивных результатов измерения УА фосфора-32 (^{32}P) в воде водоёма В-2 за 1953–1956 гг. Показано, что все расчётные результаты хорошо соответствуют имеющимся экспериментальным данным. Определены параметры источника поступления РАП из водоёма В-2 в р. Течу в зависимости от водного стока через плотину П-2. Рассмотрены экспериментальные данные о масштабах распределения УА ^{32}P по длине реки Течи. Полученные результаты позволяют учесть вклад РАП в общее радиоактивное загрязнение реки и оценить возможное радиационное воздействие на население и биоту.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: РЕКА ТЕЧА, ОЗЕРО КЫЗЫЛ-ТАШ, ВОДОЁМ В-2, ПРОМЫШЛЕННЫЙ УРАН-ГРАФИТОВЫЙ РЕАКТОР, ОБОРОТНОЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ, РАДИОНУКЛИДЫ АКТИВАЦИОННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ, ВОДНЫЙ СТОК, УДЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ, ФОСФОР-32

Настоящая работа является логичным продолжением исследований [1–3], направленных на реконструкцию параметров источников облучения жителей, проживавших в 1949–1956 гг. на берегах р. Течи.

Через р. Течу осуществляется русловой сток воды из Иртышско-Каслинской системы озёр. Ранее, до середины 1950-х годов, началом р. Течи являлся исток из оз. Иртыш с транзитом воды через оз. Кызыл-Таш. Сток воды из оз. Иртыш зарегулирован плотиной П-1, а сток воды из оз. Кызыл-Таш (водоём В-2) – плотиной П-2. Ниже по течению от плотины П-2 располагался Кокшаровский пруд (водоём В-3), а ещё ниже, в районе с. Метлино, располагался Метлинский

пруд (водоём В-4), которые были образованы путём возведения грунтовых плотин П-3 и П-4. Плотины П-3 и П-4 также были оборудованы регулируемыми водосливами. Объём воды в водоёме В-3 составлял 260–400 тыс. м³, а в водоёме В-4 – до 2 млн м³.

На ПО "Маяк" имелось пять промышленных уран-графитовых реакторов (ПУГР), которые были пущены в эксплуатацию в период с июня 1948 г. по сентябрь 1952 г. Компоновочная схема всех ПУГР была одинакова и отличалась только размерами и незначительными конструктивными особенностями. Графитовая кладка ПУГР представляет собой вертикальный цилиндр, собранный из прямоу-

гольных графитовых кирпичей в виде колонн. В центральных колоннах графитовых кирпичей имеются сквозные вертикальные отверстия, в которые устанавливаются алюминиевые трубы (технологические каналы) для размещения в них урановых блоков. Пространство по высоте и радиусу кладки, в котором размещены урановые блоки, образует активную зону (АЗ) реактора. Урановый блок представляет собой цилиндр из металлического урана естественно-го обогащения, помещённый в алюминиевую оболочку. По зазору между внутренней стенкой технологического канала и оболочкой уранового блока подавалась охлаждающая вода. За время прохождения воды через АЗ в ней образовывались радионуклиды активационного происхождения (РАП) за счёт ядерных реакций при взаимодействии реакторных нейтронов с ядрами химических элементов, содержащихся в воде. Вода для охлаждения ПУГР забиралась из водоёма В-2, и после прохождения АЗ ПУГР горячая вода, содержащая продукты активации, сбрасывалась (возвращалась) в водоём В-2, где происходило накопление РАП. Из водоёма В-2 вода поступала в р. Течу, где происходило смешивание её с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО) радиохимического производства, содержащими преимущественно радионуклиды осколочного происхождения (РОП). Считалось, что в период до 1953 г. активность РАП была пренебрежимо мала по сравнению с активностью РОП и поэтому экспериментально не определялась. Начиная с 1953 г., когда сбросы активности РОП существенно снижались, вклад РАП в суммарную активность воды р. Течи стал заметен.

Целью данной работы является оценка параметров источника поступления РАП (изотопный состав, удельная активность, радиоактивный сток и др.) в р. Течу для последующего выявления вклада этого источника в суммарное радиационное воздействие на население и биоту.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Особенности поступления воды из водоёма В-2 в р. Течу

Водоём В-2, начиная с 1948 г., использовался в качестве водоёма-охладителя прямо-

точных ПУГР. Вода в ПУГР нагревалась до температуры 90–95 °С, а затем сбрасывалась в водоём для охлаждения. Для отвода горячей воды, поступающей с ПУГР, вдоль юго-восточного берега была создана струенаправляющая дамба длиной ~3 км, образующая отводной канал (рис. 1). Время прохождения воды по каналу составляло ~10 ч. Вода выходила из канала и поступала в водоём В-2 в районе плотины П-2. При этом часть воды через выпуск плотины П-2 могла поступать в р. Течу. Считалось, что к водозаборным сооружениям "горячая" вода поступала не ранее чем через ~5 сут после сброса в водоём. Температурные съёмки, проведённые в 1958–1960 гг., показали, что под действием ветра возникают дрейфовые и градиентные течения, которые могут значительно изменять общую циркуляцию воды в водоёме. Водозабор расположен в южной части водоёма В-2, забор воды производился с глубины 4–5 м.

В период разового обследования (август 1952 г.) было показано [4]:

- температура воды в начале сбросного канала составляла 70–75 °С, а в устье канала – 48–55 °С (падение температуры воды по длине канала ~20 °С);
- при температуре воды, поступающей из оз. Иртыш, равной 16 °С, вода водоёма В-2 у устья реки была 18 °С, в противоположном конце, у плотины П-2, – 36–40 °С;
- в месте сброса ЖРО РОП – 31 °С, а на выходе из водоёма В-4 – 21 °С.

Основными источниками поступления воды в р. Течу являлись водный сток через плотину П-2 и сбросы ЖРО, которые поступали через промышленную канализацию (ПК) в 300 м ниже плотины П-2.

Водно-химический режим водоёма В-2

Озеро Кызыл-Таш (водоём В-2) относится к типу карстовых озёр [5]. Его ложе образовалось в четвертичном периоде при оседании и провале подмытых напластований известняка. Так образовались все озёра Кыштымско-Каслинской группы, которые переносят свои воды в оз. Иртыш. Ложе этих озёр, наряду с кристаллическими, труднорастворимыми породами, содержащими кремний, образуют осадочные породы морского происхождения,

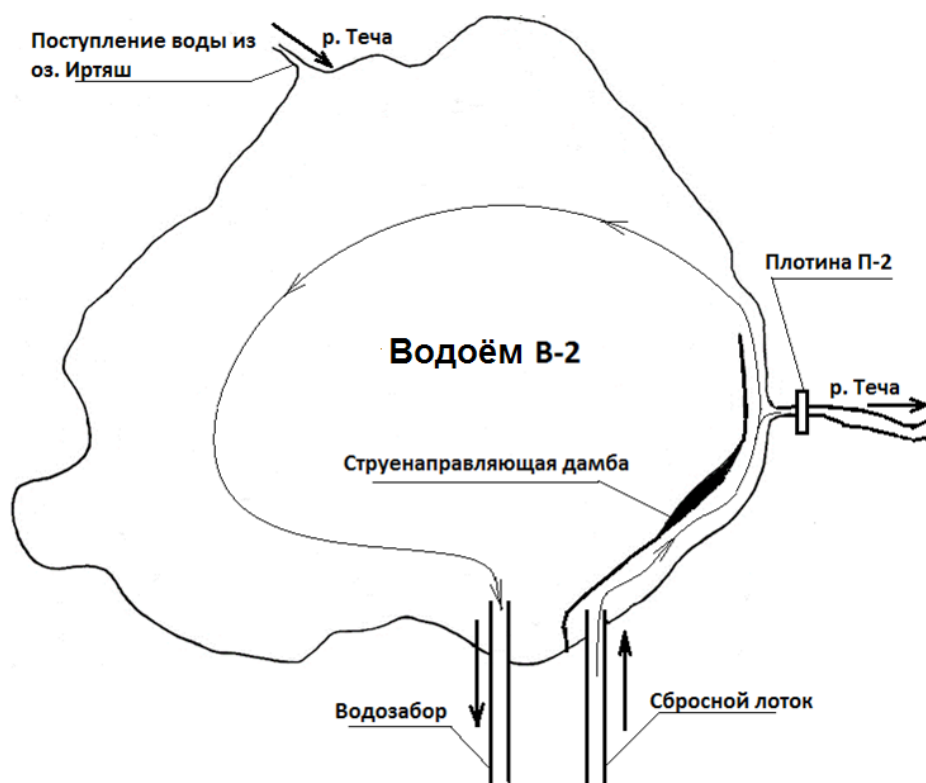


Рис. 1. Схема основных водных потоков при эксплуатации водоема В-2 в качестве водоема-охладителя ПУГР (1950-е гг.)

содержащие карбонаты кальция, магния и легкорастворимые хлористые и сернокислые соли щелочных и щелочноземельных металлов. При наличии стока легкорастворимые хлориды и сульфаты уносятся водой, и в дальнейшем идет процесс выщелачивания кремнекислоты и углекислых солей щелочноземельных металлов. Поэтому химический состав воды всех этих озер практически одинаков и характеризуется преобладанием углекальциевых и углемагние-вых солей, малым количеством хлоридов и заметным содержанием кремния [5].

Дно водоема образовано из сланцев, порфири-тов и известняков и прикрыто алювиальными отложениями, состоящими из супесчаников и суглинков тяжелого щебенистого характера. Выше располагается слой ила толщиной от 3 до 7 м. Площадь водоема составляла 18,5 км², объем — 60 млн м³ [5] (по современным данным

более 80 млн м³). Уровень воды постоянно регулируется и поддерживается в заданных отметках за счет подпитки водой из оз. Иртыш. До 1957 г. все сбросы паводковых вод из Иртышско-Каслинской системы озер производили через водоем В-2. При этом основной (фоновый) солевой и химический состав воды оз. Кызыл-Таш определялся составом Иртышской воды, а дополнительное техногенное загрязнение воды обусловлено сбросами хозяйственно-фекальных вод г. Омска, сбросами общехозяйственной и ливневой канализации промышленной площадки предприятия и др.

Вода из водоема В-2 забиралась на специальной береговой насосной станции и сначала подавалась в цех химической водоподготовки (ЦХВП) для очистки от взвешенных частиц, корректировки химического состава и последующей подачи на охлаждение ПУГР (эта вода

после выхода из реактора возвращалась обратно в водоём В-2). Другая (незначительная) часть воды подавалась на обеспечение технических нужд радиохимического производства и других потребителей (эта вода после использования сбрасывалась по линии ПК в р. Течу в виде ЖРО РОП). В ЦХВП входили: реагентный участок, дегазёры, буферные баки-ёмкости, насосные станции второго и третьего подъёма воды и др. В ЦХВП производилось осветление воды на самотечных кварцевых фильтрах, умягчение катионированием с коррекцией pH – получение химически очищенной воды [6]. Полный цикл водоподготовки – от забора воды до подачи на ПУГР – занимал несколько часов.

Контроль качества воды водоёма В-2 по минимальному количеству показателей был организован в 1950 г. По мере необходимости перечень контролируемых показателей расширялся (табл. 1). Наиболее детальный контроль качества воды проводился для оз. Иртыш (водо-

ём В-1) – основного источника питьевого водоснабжения г. Озёрска. Эти современные данные (2010 г.) по содержанию некоторых микропримесей (Cu, Ba, K, Sr, Ni и др.) в воде оз. Иртыш были использованы в качестве реперных для водоёма В-2 для 1950-х гг.

В табл. 1 приведён среднегодовой химический состав воды водоёма В-2 за период с 1951 по 1956 гг. [7] и для сравнения – воды оз. Иртыш за 2010 г. В последней колонке табл. 1 приведены характерные (референтные) значения концентрации химических элементов – C_0 , которые ниже будут использованы для проведения оценочных расчётов.

Следует отметить, что в пределах каждого года регистрировались сезонные изменения химического состава воды. Так, в марте 1954 г. "разовое" содержание сухого остатка солей в воде водоёма В-2 было 152 мг/л, из которых Ca – 49 мг/л (32 %), S – 24 мг/л (16 %), Cl – 23 мг/л (15,4 %), Si – 16,7 мг/л (11 %), Mg –

Таблица 1

Среднегодовые концентрации основных химических элементов в воде оз. Кызыл-Таш (1951–1956 гг.), Иртыш (2010 г.) и референтное значение C_0 , мг/л

Элемент	Вода оз. Кызыл-Таш (водоём В-2)						Оз. Иртыш*	C_0 , мг/л
	1951	1952	1953	1954	1955	1956	2010	
Сухой остаток	200	180	190	230	290	356	–	–
Натрий	19,7	19,0	17,6	19,4	18,2	21,0	18–20	20,0
Кальций	30,6	30,0	31,1	35,0	49	77	30–40	30,0
Магний	9,5	9,8	10,2	8,9	9,4	12,8	11–17	10,0
Хлор	13,7	13,2	13,3	15	22	24	16–22	15,0
Сера	9	15	20	25	42	55	20–30	20,0
Железо	–	0,06	0,05	0,08	0,07	0,05	0,05–0,20	0,07
Марганец	–	–	0,012	0,074	0,05	0,05	0,01–0,02	0,05
Кремний	–	–	9,6	11,1	7,4	–	2,0–7,0	10,0
Фосфор	–	–	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03–0,08	0,05
Медь	–	–	–	–	–	–	0,01–0,05	0,05
Барий	–	–	–	–	–	–	0,08–0,11	0,10
Калий	–	–	–	–	–	–	4,5–6,5	5,0
Стронций	–	–	–	–	–	–	0,15–0,28	0,30
Никель	–	–	–	–	–	–	0,05–0,12	0,10
Рубидий	–	–	–	–	–	–	–	0,0012
Уран	–	–	–	–	–	–	–	0,008

Примечание. * Диапазон сезонных изменений.

12 мг/л (8 %), а содержание остальных элементов (Na, N, Fe, P, Mn) не превышало 25 мг/л (18 %) [8]. Результаты этого разового измерения отличались в 1,3–1,8 раза от среднегодовых значений за 1954 г. (табл. 1).

Среднее содержание ^{87}Rb в воде озёр и рек равно 1,5 мБк/л [9], что соответствует концентрации рубидия 1,2 мкг/л. Содержание урана в воде водоёма В-2 (в 1950-е гг.) принято равным 8 мкг/л на основании измерений в оз. Иртяш (2000-е гг.).

Анализ данных из табл. 1 и данные работ [4, 7, 8] позволяют сделать следующие выводы:

- до 1953 г. водоём В-2 был проточным, солевой состав воды оставался практически неизменным и равным современному уровню загрязнения оз. Иртяш;

- начиная с 1953 года, загрязнение воды водоёма В-2 стало увеличиваться, поскольку водоём был переведён в слабопроточный режим с минимальным поступлением чистой воды из оз. Иртяш;

- для поддержания водно-химического режима воды водоёма В-2 в заданных пределах начиная с середины 1953 г. в ЦХВП перед подачей воды на ПУГР стали подкислять её серной кислотой [7], а содержание сульфат-иона в подкисленной воде в несколько раз превышало среднее по водоёму значение;

- подкисление воды нарушило существовавшее химическое равновесие между водой и донными отложениями в водоёме В-2, а содержание сульфатов в воде увеличилось в 5 раз [7].

Исторические особенности радиометрических измерений

Используемые на ПО "Маяк" в начале 1950-х гг. методики определения суммарной активности β -излучающих нуклидов (САБИН) были основаны на регистрации скорости счёта β -частиц торцевым счётчиком [7] (активность выражалась в единицах Ки). Методы измерения проб γ -излучающих нуклидов (САГИН) были основаны [7] на сравнении (в одинаковых геометрических условиях) ионизирующей способности анализируемого и эталонного источника, содержащего ^{226}Ra (г-экв. Ra). Для определения радионуклидного состава ЖРО (загрязнённой воды) использовали многоэтап-

ную технологию, предполагающую на первом этапе радиохимическое разделение исходного раствора на ряд групп химических элементов, обладающих сходными химическими свойствами. На последующих этапах проводились радиометрические измерения активности каждой радиохимической группы с использованием пропорционального торцевого счётчика β -частиц и дозиметров. При этом, например, активность ^{24}Na ($T_{1/2}=15$ ч) попадала в одну радиохимическую группу с ^{137}Cs , а активность ^{45}Ca ($T_{1/2}=163$ сут) – в стронциевую группу (^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{140}Ba и др.) [7]. Выделение активности ^{137}Cs производили висмутидиодным методом, который специфичен только для цезия и рубидия, или висмутнитритным методом, когда было необходимо одновременно выделять и радиоактивный натрий, и калий [7]. Такой контроль был организован начиная с 1953 г., когда поступление активности РАП в р. Течу с загрязнённой водой от реакторного производства стало сопоставимо с поступлением активности РОП от радиохимического производства или даже превышало его [10–12]. Из всех РАП измерения УА воды проводились только для ^{32}P ($T_{1/2}=14,3$ сут), который выделялся в отдельную радиохимическую группу [7].

Анализ архивных данных о радиоактивном загрязнении воды водоёма В-2 и р. Течи

Изменение радиоактивного загрязнения воды в водоёме В-2 имело сложный вид и происходило в результате изменения солевого состава воды, аварийных ситуаций, за счёт очистки воды на ЦХВП, процессов сорбции и десорбции нуклидов на донных отложениях и взвешях, радиоактивного распада, поступления чистой воды из оз. Иртяш, выпуска загрязнённой воды из водоёма при сбросах и "промывках" и др. В результате нарушения герметичности урановых блоков ПУГР в охлаждающую воду поступали РОП (^{137}Cs , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{140}Ba и др.) [7].

В 1951 г. на предприятии была разработана "Программа" и создана сеть пунктов (точек) радиационного контроля на р. Тече, включая водоёмы В-3 и В-4, которые также подвергались контролю в различных точках акватории. В табл. 2 приведена характеристика некоторых точек контроля (ТК) [7].

В табл. 3 приведены результаты измерений УА фосфора-32 (^{32}P) на различных участках р. Течи в августе-сентябре 1953 г., выполненных по специальной программе [11]. В программе предполагалось учитывать время пере-

мещения воды по реке таким образом, чтобы на последующих точках пробы отбирались из того же объёма воды, из которого они ранее отбирались на предыдущих точках (этапах). Следует отметить, что в июне, июле и августе

Таблица 2

Характеристика некоторых пунктов радиационного контроля на р. Тече (1951–1956 гг.)

Точка контроля	Положение пункта контроля	Расстояние от плотины П-2, км	Периодичность контроля
ТК-20	Точка сброса ЖРО (труба ПК)	0,30	1-2 раза в месяц
ТК-19	Верх водоёма В-3	0,50	Ежедневно
ТК-18	Центр водоёма В-3	1,5	Ежедневно
ТК-14	Ниже плотины П-3	3,5	Ежедневно
ТК-21	Ниже плотины П-4	6,0	Ежедневно
ТК-24	Теча-Брод	18	1-2 раза в месяц
ТК-27	Ст. Асаново	30	1-2 раза в месяц
ТК-30	Надыров Мост	36	1-2 раза в месяц
ТК-34	Муслюмово	79	1-2 раза в месяц
ТК-38	Бродокалмак	109	1-2 раза в месяц

Таблица 3

Распределение УА ^{32}P по длине р. Течи в зависимости от расхода воды через плотину П-2 ($Q_{\text{П-2}}$) в августе-сентябре и в декабре 1953 г. [11], Бк/л

Дата (ДД.ММ)	Точка контроля						$Q_{П-2}$ тыс. м³/сут
	ТК-19	ТК-14	ТК-21	ТК-24	ТК-27	ТК-30	
	Пруды-отстойники			р. Теча			
08.08	446	—	—	—	—	—	123
10.08	943	225	—	—	—	—	120
12.08	800	230	—	—	—	—	121
14.08	2360	1570	—	—	—	—	122
18.08	—	1520	1300	—	—	—	123
20.08	1170	960	790	—	—	—	123
22.08	2220	1650	820	990	310	—	123
24.08	2000	1730	910	690	260	300	125
26.08	1420	760	1120	680	250	130	119
28.08	680	680	740	840	415	160	36
30.08	—	—	725	480	340	100	35
01.09	—	—	—	1130	375	200	36
03.09	—	—	—	—	330	95	35
05.09	—	—	—	—	190	95	36
Среднее:	1340	1040	915	800	310	155	—
20.12	—	—	—	370	—	220	35

1953 г. происходила интенсивная подпитка водоёма В-2 чистой водой из оз. Иртяш в объёме 6,6; 9,0 и 3,2 млн м³/мес соответственно, а в августе-сентябре водный сток через плотину П-2 ($Q_{пл-2}$) изменялся от 120 до 35 тыс. м³/сут (табл. 3).

Анализ данных табл. 3 позволяет заключить:

– максимальные значения УА ³²Р наблюдались в верхней части р. Течи и достигали ~2,4 кБк/л, при минимальном значении ~0,45 кБк/л и среднем значении ~1,3 кБк/л;

– относительно высокое (до 100–300 Бк/л) содержание ³²Р в воде р. Течи прослеживалось на расстоянии до 50 км от плотины П-2;

– высокая вариабельность во времени УА ³²Р в воде верхней части р. Течи, по-видимому, связана с низкой сорбционной способностью фосфора и определяется гидрологическим режимом водного стока и особенностями перемешивания и перемещения водных

потоков по акватории водоёмов В-2, В-3 и В-4.

В табл. 4 приведены результаты измерений УА в воде сбросного лотка и в нижнем бьефе плотины П-2 (НБ П-2) за февраль–июнь 1954 г. [8, 10] (данные пересчитаны на среднемесячные значения) и за январь–май 1956 г. [12] (разовый отбор) для некоторых радиохимических групп элементов. Отбор проб в НБ П-2 проводился в точке, расположенной выше точки ТК-20 (сброс ЖРО по линии ПК).

В течение всего 1954 г. контролируемый сброс воды через плотину П-2 проводился только с 16 по 31 марта с расходом ~1,0 м³/с, а в остальное время поступление воды из водоёма В-2 в р. Течу происходило только в результате неконтролируемого просачивания воды через шандоры плотины П-2 с расходом ~0,1 м³/с [10, 12]. В мае-июне 1954 г. в водоём В-2 из оз. Иртяш поступило более 20 млн м³ чистой воды.

Таблица 4

Результаты измерений УА воды в сбросном лотке и в нижнем бьефе плотины П-2 в 1954 и 1956 гг., кБк/л [8, 10, 12]

Точка контроля	Дата (ДД).ММ.ГГ	САБИН	Sr + Ca	Cs + Na	P
Сбросной лоток *	02.54	185	99,6	7,5	11,7
	03.54	161	54,9	5,85	15,7
	04.54	274	154	14,0	10,0
	05.54	153	95,4	12,3	6,74
	06.54	151	84,6	5,0	6,6
Нижний бьеф плотины П-2 (НБ П-2) *	02.54	48,8	27,1	1,95	2,40
	03.54	32,6	14,6	0,82	1,30
	05.54	38,5	24,9	1,40	1,63
	06.54	20,3	15,4	1,57	0,83
Отношение: Лоток/НБ П-2 *	02.54	3,8	3,7	3,8	4,9
	03.54	4,9	3,8	7,1	12
	05.54	4,0	3,8	8,8	4,1
	06.54	7,9	5,5	3,2	8,3
Сбросной лоток (разовый отбор)	(06).01.56	122	52,5	11,5	5,8
	(08).02.56	107	29,6	23,4	6,4
	(08).03.56	85	30,6	32	2,4
	(19).04.56	97,5	43	11,3	1,75
	(09).05.56	82	21,5	13,5	8,1

Примечание. * Точные даты отбора проб воды в 1954 г. неизвестны (данные пересчитаны на среднемесячные значения).

Краткий анализ представленных в табл. 4 данных позволяет заключить:

- в феврале–апреле 1954 г. УА всех радионуклидов в воде сбросного лотка и в НБ П-2 оставалась практически постоянной (изменялась до 2-3 раз);
- в мае-июне 1954 г. можно выявить незначительную тенденцию пропорционального снижения УА всех радионуклидов, что, по-видимому, обусловлено прохождением весеннего паводка;
- относительный вклад активности фосфора в САБИН составлял 3–6 %;
- результаты измерений УА в 1956 г. в целом соответствуют результатам 1954 г., а незначительное снижение УА САБИН практически полностью обусловлено уменьшением вклада активности радиохимической группы (Sr + Ca).

Методика расчёта продуктов активации

В табл. 5 приведены некоторые характеристики ядерных реакций радиационного захвата, которые обычно протекают на тепловых нейтронах (ТН), и пороговых реакций, которые, как правило, протекают только на быстрых нейтронах спектра деления (СД). Для некоторых экзотермических ядерных реакций (например, $^{35}\text{Cl} (n,p) ^{35}\text{S}$) реакция интенсивно протекает и на быстрых, и на тепловых нейтронах [13, 14]. Учитывались только те ядерные реакции, которые приводят к образованию РАП с периодом полураспада более 2 ч.

Рассмотрим математическую модель условного ПУГР, которая эквивалентна пяти реальным ПУГР и описывается следующими усреднёнными параметрами:

- среднее значение плотности потока тепловых нейтронов в кольцевом зазоре, по которому протекает охлаждающая вода, $\Phi_0 = 2,5 \cdot 10^{13}$, нейтр./(с·см²);
- среднее значение плотности потока быстрых нейтронов спектра деления в том же кольцевом зазоре, $\Phi_f = 5,0 \cdot 10^{13}$, нейтр./(с·см²);
- суммарный объём охлаждающей воды, находящейся в условном ПУГР, примем равным $V_{\text{ПУГР}} = 8 \text{ м}^3$ (8000 л);
- продолжительность пребывания охлаждающей воды в АЗ ПУГР, $t_0 = 2$ с;
- среднее время, за которое охлаждаю-

щая вода пройдёт расстояние от выхода из АЗ ПУГР до участка сбросного канала у выпуска плотины П-2, $T_1 = 10$ ч;

- объём воды в водоёме В-2, $V_{\text{В-2}} = 80$ млн м³.

Значение УА j -го РАП в горячей воде на выходе из ПУГР – A_j^{out} (Бк/л) можно записать в следующем виде:

$$A_j^{\text{out}} = N_j \cdot F \cdot \sigma_j \cdot \lambda_j \cdot t_0, \quad (1)$$

где N_j – число ядер-мишеней j -го изотопа в 1 л воды водоёма В-2, л⁻¹;

F – плотность потока быстрых нейтронов – Φ_f или тепловых нейтронов – Φ_0 (в зависимости от типа ядерной реакции) в кольцевом зазоре ПУГР, по которому протекает охлаждающая вода, нейтр./(с·см²);

σ_j – эффективное сечение j -ой ядерной реакции для быстрых или тепловых нейтронов (табл. 5), барн;

λ_j – постоянная распада j -го РАП, с⁻¹.

При оценке значения УА j -го радионуклида в воде водоёма у плотины П-2 – $A_j^{\text{П-2}}$ следует учитывать только процесс радиоактивного распада, поскольку на этом участке сбросного канала разбавления и перемешивания движущегося потока озёрной водой практически не происходит:

$$A_j^{\text{П-2}} = A_j^{\text{out}} \cdot \exp(-\lambda_j \cdot T_1). \quad (2)$$

В работе [7] отмечается, что сброшенная из ПУГР вода вновь поступает на водозаборные сооружения не ранее чем через 6–8 сут. В идеализированном случае будем считать, что полный обмен (перемешивание) воды в водоёме В-2 происходит только после установления радиоактивного равновесия.

Тогда равновесное усреднённое значение УА j -го РАП в воде водоёма В-2 – $A_j^{\text{В-2}}$ в предположении идеализированного процесса перемешивания воды по всему объёму водоёма можно записать:

$$A_j^{\text{В-2}} = N_j \cdot F \cdot \sigma_j \cdot \exp(-\lambda_j \cdot T_1) \cdot V_{\text{ПУГР}} / V_{\text{В-2}}. \quad (3)$$

Результаты расчётов по уравнению (3) позволяют получить только максимальную оценку значения УА j -го РАП в воде водоёма В-2, поскольку оно не учитывает сорбцию РАП на донных отложениях и взвешях, подпитку водоёма В-2 чистой водой из оз. Иртяш, сброс загрязнённой воды из водоёма В-2 в р. Течу и др.

Таблица 5

Характеристики некоторых ядерных реакций на тепловых (ТН) и быстрых (СД) нейтронах: сечения и период полураспада ($T_{1/2}$) образовавшегося нуклида [13, 14]

Ядро-мишень, %	Реакция	Сечение σ , барн	Спектр нейтронов	$T_{1/2}$
^{23}Na (100)	$^{23}\text{Na} (n,\gamma) ^{24}\text{Na}$	0,53	ТН	15 ч
^{24}Mg (79)	$^{24}\text{Mg} (n,p) ^{24}\text{Na}$	0,0015	СД	15 ч
^{30}Si (3,1)	$^{30}\text{Si} (n,\gamma) ^{31}\text{Si}$	0,107	ТН	2,62 ч
^{31}P (100)	$^{31}\text{P} (n,p) ^{31}\text{Si}$	0,0355	СД	2,62 ч
^{31}P (100)	$^{31}\text{P} (n,\gamma) ^{32}\text{P}$	0,172	ТН	14,3 сут
^{32}S (95)	$^{32}\text{S} (n,p) ^{32}\text{P}$	0,0668	СД	14,3 сут
^{33}S (0,75)	$^{33}\text{S} (n,p) ^{33}\text{P}$	0,076	СД	25 сут
^{33}S (0,75)	$^{33}\text{S} (n,\gamma) ^{34}\text{S}$	0,002	ТН	25 сут
^{34}S (4,2)	$^{34}\text{S} (n,\gamma) ^{35}\text{S}$	0,227	ТН	88 сут
^{35}Cl (75,8)	$^{35}\text{Cl} (n,p) ^{35}\text{S}$	0,078	СД	88 сут
^{35}Cl (75,8)	$^{35}\text{Cl} (n,p) ^{35}\text{S}$	0,49	ТН	88 сут
^{35}Cl (75,8)	$^{35}\text{Cl} (n,\alpha) ^{32}\text{P}$	0,0088	СД	14,3 сут
^{41}K (6,73)	$^{41}\text{K} (n,\gamma) ^{42}\text{K}$	1,46	ТН	12,4 ч
^{42}Ca (0,65)	$^{42}\text{Ca} (n,p) ^{42}\text{K}$	0,0034	СД	12,4 ч
^{43}Ca (0,13)	$^{43}\text{Ca} (n,p) ^{43}\text{K}$	0,0023	СД	22,6 ч
^{44}Ca (2,09)	$^{44}\text{Ca} (n,\gamma) ^{45}\text{Ca}$	0,88	ТН	163 сут
^{46}Ca (0,0035)	$^{46}\text{Ca} (n,\gamma) ^{47}\text{Ca}$	0,74	ТН	4,53 сут
^{48}Ca (0,19)	$^{48}\text{Ca} (n,2n) ^{47}\text{Ca}$	0,00036	СД	4,53 сут
^{55}Mn (100)	$^{55}\text{Mn} (n,\gamma) ^{56}\text{Mn}$	13,3	ТН	2,58 ч
^{54}Fe (5,81)	$^{54}\text{Fe} (n,p) ^{54}\text{Mn}$	0,080	СД	312 сут
^{58}Fe (0,29)	$^{58}\text{Fe} (n,\gamma) ^{59}\text{Fe}$	1,28	ТН	45,1 сут
^{58}Ni (68,3)	$^{58}\text{Ni} (n,p) ^{58}\text{Co}$	0,108	СД	70,8 сут
	$^{58}\text{Ni} (n,p) ^{58m}\text{Co}$	0,0354	СД	9,15 ч
^{63}Cu (69,2)	$^{63}\text{Cu} (n,\gamma) ^{64}\text{Cu}$	4,5	ТН	12,7 ч
^{85}Rb (72,2)	$^{85}\text{Rb} (n,\gamma) ^{86}\text{Rb}$	0,48	ТН	18,7 сут
^{86}Sr (9,84)	$^{86}\text{Sr} (n,\gamma) ^{87m}\text{Sr}$	0,84	ТН	2,81 ч
^{88}Sr (82,6)	$^{88}\text{Sr} (n,\gamma) ^{89}\text{Sr}$	0,0058	ТН	50,5 сут
^{130}Ba (0,11)	$^{130}\text{Ba} (n,\gamma) ^{131}\text{Ba}$	11,3	ТН	12,0 сут
	$\rightarrow ^{131}\text{Cs} \rightarrow ^{131}\text{Xe}$			9,7 сут
^{132}Ba (0,10)	$^{132}\text{Ba} (n,\gamma) ^{133m}\text{Ba}$	0,5	ТН	38,9 ч
^{134}Ba (2,42)	$^{134}\text{Ba} (n,\gamma) ^{135m}\text{Ba}$	0,158	ТН	28,7 ч
^{138}Ba (71,7)	$^{138}\text{Ba} (n,\gamma) ^{139}\text{Ba}$	0,36	ТН	1,38 ч
^{238}U (99,3)	$^{238}\text{U} (n,\gamma) ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np}$	2,68	ТН	23,5 мин 2,35 сут

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В табл. 6 приведены результаты расчётов
УА воды в различных точках водоёма В-2,

выполненных по уравнениям (1)–(3).

Анализ материалов табл. 4 и 6 позволяет
сделать следующие выводы:

– среди всех РАП – химических аналогов

Таблица 6

Результаты расчётов удельной активности РАП в воде
на различных участках водоёма В-2

Реакция	Спектр нейтронов	Удельная активность, Бк/л		
		A_j^{out}	$A_j^{П-2}$	A_j^{B-2}
$^{23}\text{Na} (n,\gamma) ^{24}\text{Na}$	ТН	178000	112000	440
$^{24}\text{Mg} (n,p) ^{24}\text{Na}$	СД	380	240	0,94
$^{30}\text{Si} (n,\gamma) ^{31}\text{Si}$	ТН	2450	170	0,11
$^{31}\text{P} (n,p) ^{31}\text{Si}$	СД	250	18	0,01
$^{31}\text{P} (n,\gamma) ^{32}\text{P}$	ТН	4,7	4,6	0,41
$^{32}\text{S} (n,p) ^{32}\text{P}$	СД	1300	1300	120
$^{33}\text{S} (n,p) ^{33}\text{P}$	СД	6,7	6,6	1,0
$^{33}\text{S} (n,p) ^{33}\text{P}$	ТН	0,09	0,09	0,01
$^{34}\text{S} (n,\gamma) ^{35}\text{S}$	ТН	16	15	8,4
$^{35}\text{Cl} (n,p) ^{35}\text{S}$	СД	140	140	76
$^{35}\text{Cl} (n,p) ^{35}\text{S}$	ТН	440	440	240
$^{35}\text{Cl} (n,\alpha) ^{32}\text{P}$	СД	97	95	8,5
$^{41}\text{K} (n,\gamma) ^{42}\text{K}$	ТН	5600	3200	10
$^{42}\text{Ca} (n,p) ^{42}\text{K}$	СД	15	8,5	0,03
$^{42}\text{Ca} (n,p) ^{43}\text{K}$	СД	1,1	0,8	0,005
$^{44}\text{Ca} (n,\gamma) ^{45}\text{Ca}$	ТН	19	19	19
$^{46}\text{Ca} (n,\gamma) ^{47}\text{Ca}$	ТН	0,9	0,8	0,02
$^{48}\text{Ca} (n,2n) ^{47}\text{Ca}$	СД	0,05	0,05	0,001
$^{55}\text{Mn} (n,\gamma) ^{56}\text{Mn}$	ТН	27000	1900	1,2
$^{54}\text{Fe} (n,p) ^{54}\text{Mn}$	СД	0,009	0,009	0,02
$^{58}\text{Fe} (n,\gamma) ^{59}\text{Fe}$	ТН	0,024	0,024	0,007
$^{58}\text{Ni} (n,p) ^{58}\text{Co}$	СД	0,87	0,87	0,4
$^{58}\text{Ni} (n,p) ^{58\text{m}}\text{Co}$	СД	53	25	0,06
$^{63}\text{Cu} (n,\gamma) ^{64}\text{Cu}$	ТН	1100	650	2,2
$^{85}\text{Rb} (n,\gamma) ^{86}\text{Rb}$	ТН	0,11	0,10	0,012
$^{86}\text{Sr} (n,\gamma) ^{87\text{m}}\text{Sr}$	ТН	600	50	0,04
$^{88}\text{Sr} (n,\gamma) ^{89}\text{Sr}$	ТН	0,08	0,08	0,02
$^{130}\text{Ba} (n,\gamma) ^{131}\text{Ba} \rightarrow ^{131}\text{Cs} \rightarrow ^{131}\text{Xe}$	ТН	0,2	0,2	0,1
$^{132}\text{Ba} (n,\gamma) ^{133\text{m}}\text{Ba}$	ТН	0,06	0,05	0,0005
$^{134}\text{Ba} (n,\gamma) ^{135\text{m}}\text{Ba}$	ТН	0,6	0,5	0,003
$^{138}\text{Ba} (n,\gamma) ^{139}\text{Ba}$	ТН	800	5	0,002
$^{238}\text{U} (n,\gamma) ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np}$	ТН	9,2	8,2	0,12
Сумма		220000	120000	920

^{137}Cs – максимальный вклад в УА воды может вносить короткоживущий ^{24}Na ($T_{1/2}=15$ ч) и, в меньшей степени, ^{42}K ($T_{1/2}=12,4$ ч), но влияние этих радионуклидов на результаты измерений УА ^{137}Cs может просматриваться только вблизи плотины П-2 (в водоёмах В-3 и В-4);

– из химических аналогов ^{90}Sr заметный вклад в УА стронциевой группы может вносить только ^{45}Ca ($T_{1/2}=163$ сут);

– существенный вклад в общую (суммарную) УА воды р. Течи могут вносить ^{32}P ($T_{1/2}=14,3$ сут) и ^{35}S ($T_{1/2}=88$ сут).

Следует отметить, что при β -распаде РАП ^{32}P , ^{35}S , ^{45}Ca отсутствует сопутствующее γ -излучение. Причём ^{35}S и ^{45}Ca обладают очень мягким спектром β -излучения (0,167 и 0,256 МэВ соответственно), что могло существенно (до 3–5 раз) исказить (занижать) результаты архивных измерений активности в 1950-х гг.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных позволяет сделать следующие обобщения:

1. Прямое поступление РАП из водоёма В-2 в р. Течу возможно только из района расположения плотины П-2 по двум путям:

– через плотину П-2 при открытых шандорах (контролируемый сброс воды);

– через закрытые шандоры плотины П-2 (неконтролируемое просачивание воды с оценённым расходом $\sim 0,1$ м³/с).

Дополнительное поступление РОП и РАП происходило по трубе ПК.

2. Результаты экспериментальных измерений [8, 10, 12] показывают, что максимальные значения УА воды водоёма В-2 фиксировались в сбросном лотке и в канале, отделённом от водоёма струенаправляющей дамбой, а минимальные – в районе водозабора (рис. 1). В качестве расчётной оценки минимального значения УА воды будем использовать результат, полученный по уравнению (3), который на самом деле больше соответствует среднему по всему объёму водоёма значению УА. В качестве исходной расчётной оценки максимального значения УА воды водоёма будем использовать сумму результатов, полученных по уравнениям (2) и (3). В табл. 7 приведены вышеуказанные расчётные оценки УА воды водоёма В-2, полученные для наиболее значимых РАП при референтных значениях (табл. 1) концентраций соответствующих химических элементов (C_0), и возможный диапазон изменения этих концентраций в долях от C_0 (табл. 1) за период 1951–1956 гг.

Результаты расчётов (табл. 5–7) показывают, что для наиболее долгоживущих РАП – ^{35}S и ^{45}Ca – значения УА в сбросном канале (A_j^{I-2}) близки к равновесным значениям УА водоёма В-2 (A_j^{B-2}), которые во многом определяются предыдущей историей эксплуатации ПУТР и водоёма (подпитка чистой водой, сброс грязной воды и др.). Для РАП с небольшими периодами полураспада (^{24}Na , ^{42}K) значения УА в сбросном канале (A_j^{I-2}) в десятки и сотни раз превышают средние по объёму водоёма значе-

Таблица 7

Минимальная и максимальная расчётная оценка удельной активности основных радионуклидов в воде водоёма В-2, Бк/л

Радионуклид (РАП)	$T_{1/2}$	Для референтных значений (C_0)		Диапазон изменения концентраций (в долях от C_0)
		Минимальная – водозабор (A_j^{B-2})	Максимальная – сбросной канал ($A_j^{B-2} + A_j^{I-2}$)	
^{24}Na	15 ч	440	110000	0,9–1,1
^{32}P	14,3 сут	120	1 500	0,5–2,6
^{35}S	88 сут	320	920	0,9–1,6
^{45}Ca	163 сут	20	40	1,0–2,6
^{42}K	12,4 ч	10	3200	–

ния УА (A_j^{B-2}). Поступление этих РАП в водоём В-2 может быть неравномерным во времени и определяться текущим режимом эксплуатации ПУГР (например, изменение суммарной мощности ПУГР при проведении ремонтных работ или при остановках для перегрузки урана). Поступление всех РАП в воды р. Течи может в значительной степени зависеть от метеоусловий (осадки, ветровой режим, сезон года), определяющих условия разбавления воды в канале и в водоёме В-2.

3. Данные табл. 7 показывают, что в первые 3–5 дней после отбора пробы воды из сбросного лотка УА воды обусловлена в основном ^{24}Na и ^{42}K . Этот вывод хорошо соответствует экспериментальным данным работы [12], где указано, что "...через 8–10 ч активность воды из сбросного канала снижается в два раза, а через 60–80 ч (пять периодов полураспада ^{24}Na) – в 25–30 раз" (см. рис. 2). Продолжительность времени от момента отбора пробы до начала измерений составляла не менее 10–15 ч, поэтому реальная УА САБИН в воде сбросного лотка

(канала) должна быть, по крайней мере, в 2 раза больше, чем указано в табл. 4. При этом расчётное значение УА САБИН (табл. 6) хорошо совпадает с экспериментальными значениями (табл. 4). Активность всех других радиохимических групп элементов в анализируемой пробе всегда указывалась в процентах от САБИН. Поэтому некоторые результаты архивных измерений могут включать неопределённость, связанную с отсутствием учёта распада короткоживущих РАП в САБИН за время от момента отбора пробы воды до проведения радиометрических измерений.

При УА ^{24}Na в воде сбросного лотка, равной 0,20 МБк/л (табл. 6 и 7), значение эквивалентной внешней дозы γ -излучения для взрослого человека на берегу водоёма составит ~0,085 мЗв/ч. При расчётах использовалось значение коэффициента дозового преобразования ($1,2 \cdot 10^{-16} \text{ Зв} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Бк}^{-1}$), равное (по геометрическому фактору) $\frac{1}{4}$ от соответствующего значения [15] при погружении человека в загрязнённую воду.

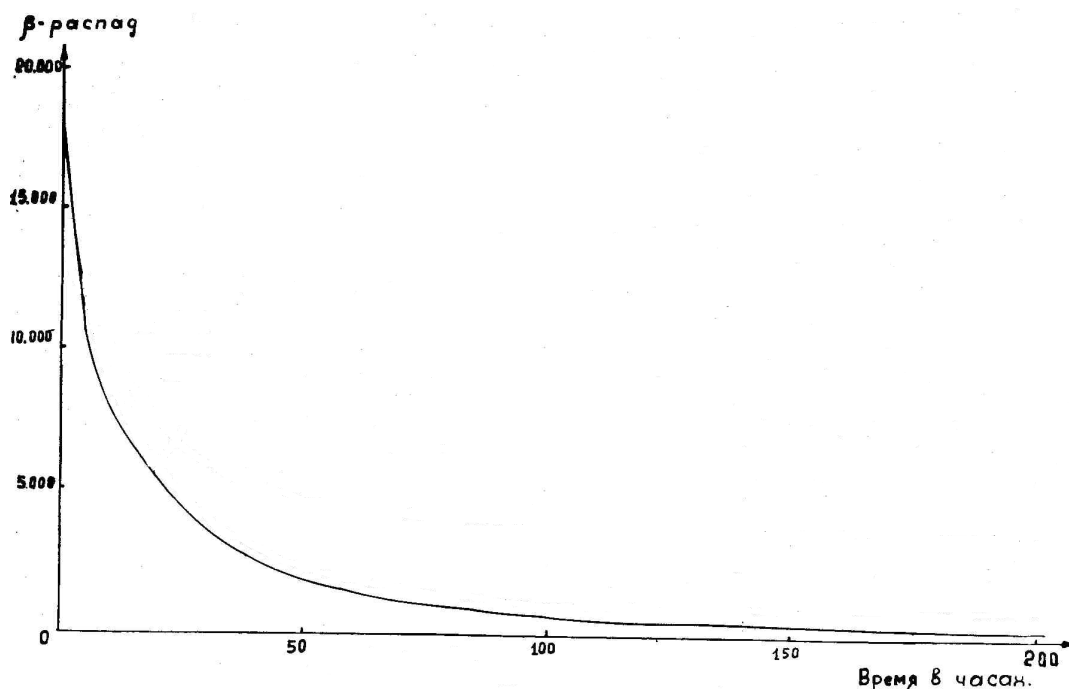


Рис. 2. Изменение скорости счёта β -частиц на торцевом счётчике в зависимости от времени выдержки (проба воды отобрана из сбросного лотка ПУГР), архивный рисунок, заимствованный из работы [12], 1956 г.

4. Через 4-5 сут после выхода из ПУГР УА сбросной воды определялась преимущественно ^{32}P и, в меньшей степени, ^{35}S . Результаты расчётов (табл. 6) показывают, что основная часть активности ^{35}S образуется в результате реакции на ядрах хлора-35, а ^{32}P образуется в результате пороговой реакции на ядрах серы-32. В общем перечне РАП ^{32}P занимает особое место, поскольку только для этого РАП имеются экспериментальные данные о его удельной активности в водных объектах. В данной работе приведены практически все архивные результаты измерений за период до 1957 г.

Продолжительность радиохимического анализа по выделению и измерению активности ^{32}P занимает не более 10–15 ч [7], а продолжительность возможного хранения отобранных проб не превышала 2 сут, что значительно меньше периода его полураспада, и поэтому длительность лабораторных измерений не может существенным образом повлиять на получаемые результаты. По данным [12], УА воды водоёма В-2 по ^{32}P составляла 5–10 % от суммарной УА всех β -излучающих нуклидов, что не противоречит расчётным результатам (табл. 6 и 7).

Экспериментальных данных о содержании ^{24}Na , ^{35}S , ^{45}Ca и ^{42}K и других РАП в воде водоёма В-2 и р. Течи за 1950-е гг. в архивах предприятия обнаружить не удалось.

5. Выделим ряд антропогенных и природных факторов, которые могут определять УА ^{32}P (и других РАП) в водоёме В-2 и р. Тече:

- поступление в водоём В-2 больших объёмов чистой воды в результате весеннего паводка и/или подпитки из оз. Иртяш;
- водный сток через плотину П-2 (определяет поступление РАП в р. Течу);
- режим подкисления серной кислотой воды, подаваемой для охлаждения ПУГР;
- сезонные изменения распределения объёмного расхода воды по длине реки, связанные с потерей водного стока зимой (промерзание и образование наледей на отдельных участках) или резким возрастанием водного стока весной в период паводка.

Следует отметить также ряд субъективных факторов, связанных с особенностями проведения гидрологического и радиационного контроля в 1950-е гг., которые необходимо учитывать

при анализе экспериментальных архивных данных. Водный сток на верхнем участке р. Течи определяли ежедневно только в створе плотин П-1 и П-2 (с учётом дополнительного объёма сточных вод ПК). При этом предполагали, что на участке реки от плотины П-2 до П-4 водный сток оставался неизменным. Данные о среднем месячном водном стоке на среднем участке р. Течи для створа пос. Бродокалмак (ТК-38) получали из гидрологических "Ежегодников" [16]. Данные о периодичности отбора проб в пунктах контроля приведены в табл. 2. Для проб воды, которые отбирались ежедневно, определялась только УА САБИН, а определение радиохимического состава (по группам элементов с подобными химическими свойствами) обычно проводили только один раз в месяц. При этом дату отбора проб воды, как правило, не указывали, а полученные результаты интерпретировали как среднемесячные. Такой порядок обработки данных мог приводить к существенному искажению расчётных результатов, поскольку в пределах одного месяца значение суточного водного стока через плотину П-2 могло изменяться до 10 раз, а значения УА – до 5-6 раз.

6. В р. Течу загрязнённая радионуклидами вода поступала с реакторных заводов (РЗ) и с радиохимических заводов (РХЗ) по двум путям: из водоёма В-2 через плотину П-2; по коллектору промышленной канализации (ПК), куда направлялись сточные воды РЗ, РХЗ и ЦХВП.

В августе 1953 г. непрерывный сброс воды из водоёма В-2 в р. Течу через плотину П-2 для разбавления ЖРО был прекращён, а шандоры плотины П-2 открывались только на период паводка или в аварийных случаях. Но даже при закрытых шандорах происходило заметное ($\sim 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$) поступление воды из водоёма В-2 в р. Течу за счёт просачивания воды через зазоры в шандорах, а вклад этих РАП (поступающих из водоёма В-2), в суммарную УА воды р. Течи, был значим [7].

Характерное общее поступление воды в верховье р. Течи в 1953–1956 гг. составляло $Q_{\Sigma} \sim 0,4 \text{ м}^3/\text{с}$ ($\sim 35 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$) и складывалось из поступления через плотину П-2 – $Q_{П-2} \approx 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$, поступления через коллектор ПК с РЗ, ЦХВП ($\sim 0,21 \text{ м}^3/\text{с}$) и из РХЗ ($\sim 0,09 \text{ м}^3/\text{с}$), всего $Q_{ПК} \approx 0,30 \text{ м}^3/\text{с}$. Причём вся вода ПК изначально забиралась из водоёма В-2, а нахождение

её на заводах не превышало нескольких суток, и поэтому содержание примесей долгоживущих радионуклидов (^{32}P , ^{35}S , ^{45}Ca и др.) в воде ПК соответствовало A_j^{B-2} . По данным "разовых" измерений в апреле-мае 1954 г. [10], УА ^{32}P в воде, фильтрующейся через плотину П-2, была ~ 720 Бк/л, а в воде канализационной линии ~ 110 Бк/л. Эти результаты (с учётом разбавления в районе плотины П-2 сбросной воды из канала водой из водоёма В-2) хорошо соответствуют расчётным данным (табл. 7).

7. Оценим значение коэффициента разбавления K_p сбросной воды из лотка водой из водоёма В-2 как отношение УА в воде НБ П-2 к УА в воде сбросного лотка. В зависимости от метеоусловий и водного стока через плотину П-2, значение K_p для УА ^{32}P в феврале-июне 1954 г. изменялось в диапазоне 0,08–0,25 (табл. 4).

В предположении равномерного и однородного перемешивания этих водных потоков, результирующую УА ^{32}P в воде верхней части р. Течи (в ТК-19) можно записать:

$$A_{\text{ТК-19}}^{\text{Теча}} = \frac{(K_p \cdot A_j^{\text{П-2}} \cdot Q_{\text{П-2}} + A_j^{B-2} \cdot Q_{\text{ПК}})}{Q_{\text{П-2}} + Q_{\text{ПК}}}. \quad (4)$$

8. В феврале-апреле 1954 г. УА ^{32}P в воде сбросного лотка составила (10–16) кБк/л, а в январе-феврале 1956 г. снизилась в $\sim 2,5$ раза и достигла (5,8–6,4) кБк/л (табл. 4). Результаты этих измерений существенно (в 3–10 раз) превышают расчётные оценки (табл. 7), которые получены при концентрации серы в воде, равной 20 мг/л (среднее для 1953 г.). С 1953 г. в ЦХВП начат процесс активного подкисления водоёма В-2 серной кислотой, что привело (табл. 1) к увеличению концентрации серы до 25 мг/л в 1954 г. и до 55 мг/л в 1956 г. В процессе подкисления содержание сульфат-иона в воде, поступающей на охлаждение ПУГР, превышало в 2–5 раз текущее среднее содержание серы в воде водоёма. С учётом этих замечаний совпадение экспериментальных и расчётных данных по УА ^{32}P в воде сбросного канала следует признать хорошим. При этом УА ^{32}P в воде центральной части водоёма В-2 была в 20–50 раз меньше, чем в сбросном канале, и составляла 85–110 Бк/л [8], что тоже хорошо соответствует расчётным оценкам (табл. 6 и 7).

9. С 16 марта 1954 г. для спуска паводковых вод из оз. Иртяш была открыта плотина

П-2 и в р. Течу стало ежесуточно поступать $Q_{\text{П-2}} \sim 0,1$ млн м^3 воды. Точно определить степень перемешивания и продолжительность движения водного потока по водоёмам В-3 и В-4 не представляется возможным из-за турбулентного характера движения и меандрирования струи. Можно только полагать, что при таком водном стоке среднее время нахождения воды в водоёме В-3 составляло ~ 3 сут, а в водоёме В-4 – около 10 сут (с учётом наличия застойных зон), что привело к 3–4-кратному увеличению УА САБИН в воде верхней части водоёма В-3 (ТК-19) и в 1,5–2 раза на выходе из водоёма В-4 (ТК-21) [8]. Резкое изменение активности γ -излучающих нуклидов в воде имело место лишь на участке от плотины П-2 до выхода из водоёма В-3 [8], что, по-видимому, было обусловлено поступлением ^{24}Na .

Всего за март-июнь 1954 г. из водоёма В-2 в р. Течу было сброшено ~ 6 млн м^3 воды, а из оз. Иртяш поступило более 20 млн м^3 чистой воды (около 30 % объёма водоёма В-2), что при условии полного перемешивания воды должно было привести к снижению среднего по водоёму значения УА (A_j^{B-2}) на 30 % для всех РАП.

В 1954 г. концентрация основных солей в воде оз. Иртяш составила: Na – 6,2 мг/л; Cl – 7 мг/л и S – 8 мг/л, что было в 3,2, 2,1 и 2,5 раза меньше, чем в воде водоёма В-2. Следовательно, УА короткоживущих РАП в воде сбросного лотка могла снизиться до 2–3 раз при условии, что на охлаждение ПУГР поступила относительно чистая вода из оз. Иртяш (без смешения с водой водоёма В-2). Дополнительное снижение УА РАП могло произойти в период весеннего паводка, когда в водоём поступает большой объём талой воды, которая по своему химическому составу близка к дистиллированной воде (практически не содержит солей). При совокупном воздействии всех вышеперечисленных факторов в мае-июне действительно произошло 2–3-кратное снижение УА ^{32}P в воде сбросного канала и НБ П-2 (табл. 4). Причём разбавление воды водоёма В-2 чистой паводковой водой происходило как на водозаборе, так и при поступлении воды через плотину П-2.

10. За 1955 г. архивных данных о содержании ^{32}P в воде водоёма В-2 и р. Течи не обнаружено.

В феврале-мае 1956 г. из водоёма В-2 в

р. Течи было сброшено около 14 млн м³ воды, а из оз. Иртяш поступило более 20 млн м³ чистой воды. Следует особо отметить, что в пределах одного месяца сток через плотины П-2, П-3 и П-4 изменялся до 5-6 раз, что не способствовало установлению равновесного стационарного состояния и сопровождалось разнонаправленным изменением УА ³²P в воде водоёма В-2 и р. Течи (табл. 4). В период весеннего паводка 1956 г. (март-апрель) УА ³²P и (Cs + Na) в воде сбросного лотка также снижалась до 3–5 раз, но при этом УА других контролируемых радионуклидов практически не изменялась (табл. 4).

11. Распределения УА ³²P по длине р. Течи (от ТК-19 до ТК-30) за август-сентябрь 1953 г. (табл. 3) не всегда имели монотонный вид, что можно объяснить турбулентными особенностями разбавления и перемешивания двух водных потоков (сток через ПК и П-2) и/или погрешностью экспериментальных измерений УА. Вместе с тем на характер распределения УА ³²P по длине реки р. Течи влияет ряд дополнительных факторов. На участке от ТК-19 до ТК-21 водоёмы В-3 и В-4 должны демпфировать (выравнивать во времени) значения УА воды на выходных створах.

На участке ниже ТК-21 длиной ~20 км расположена широкая (до 2 км) заболоченная пойма (Асановские болота), которая играла неоднозначную роль в формировании водного стока, а значит, и УА. В летнюю межень на этом участке реки обычно наблюдали существенную (до 2-3 раз) потерю водного стока за счёт испарения, а в период весеннего паводка значение водного стока в ТК-38 было значительно (до 20–30 раз) больше, чем в ТК-21. При этом значения УА ³²P на участке реки ниже плотины П-4 быстро снижались за счёт разбавления речной воды чистой водой поверхностного стока. Таким образом, на участке Асановских болот наблюдались значительные изменения скорости течения реки и времени её пребывания (выдержки) на заболоченных участках, что сопровождалось изменением УА на нижележащих участках за счёт радиоактивного распада.

12. В результате аварийных ситуаций, связанных с разгерметизацией урановых блоков ПУГР, происходило поступление урана и осколков деления в воду водоёма В-2. При этом РОП образовывались как в результате "выщелачивания" их из урановых блоков, так и при делении растворённого в воде водоёма урана.

В 1954 г. характерные значения УА САБИН, (Sr + Ca), (Cs + Na) и ³²P в воде сбросного лотка составляли ~150, ~90, ~8 и ~7 кБк/л соответственно (табл. 4). Через 5 дней выдержки УА САБИН снижалась в ~30 раз, а УА САГИН в ~200 раз. В том же 1954 г. УА воды в центре водоёма была в 150–200 раз меньше, чем в сбросном лотке и составляла для: САБИН – 1,1 кБк/л, (⁹⁰Sr + ⁸⁹Sr) – 440 Бк/л, ¹³⁷Cs – 44 Бк/л и ³²P – 52 Бк/л [8, 10]. Это означает, что основная часть УА воды в сбросном лотке была обусловлена излучением короткоживущих РОП. Такими РОП для стронциевой группы могли быть: ⁹¹Sr (9,5 ч), ⁹²Sr (2,07 ч), ¹⁴⁰Ba (12,8 сут) и др., а для цезиевой группы: ¹³⁶Cs (13 сут), ¹³⁸Cs (32 мин), ⁸⁸Rb (17,8 мин) и др.

Измеренное значение УА радиохимической группы (Cs + Na) в воде сбросного лотка (табл. 4) сопоставимо с расчётным значением УА ²⁴Na (табл. 7), но при этом масса (число ядер) ²⁴Na в 1 л воды должна быть 17500 раз меньше, чем масса ¹³⁷Cs. Это означает, что ²⁴Na не мог вносить значимый вклад в УА радиохимической группы (Cs + Na).

13. В октябре 1956 г. на участке ниже водоёма В-4 русло р. Течи было перекрыто глухой плотиной П-10 и образован водоём В-10. К весне 1957 г. были построены Левобережный и Правобережный обводные каналы для сброса паводковых вод в обход водоемов В-2, В-3, В-4, В-10 и сброс ЖРО в открытую гидрографическую сеть был полностью прекращён.

ВЫВОДЫ

1. Собраны и проанализированы данные о содержании 16 химических элементов в воде водоёма В-2 за период 1951–1956 гг. с учётом их характерного природного содержания в воде Иртышско-Каслинской системы озёр и с учётом дополнительного техногенного загрязнения водоёма в процессе его эксплуатации.

2. Предложена математическая модель и выполнены расчёты УА воды водоёма В-2 для 16 химических элементов и 31 ядерной реакции, в результате которых образуются 20 РАП. Модель верифицирована на основе архивных результатов измерения УА фосфора-32 (³²P) в

воде водоёма В-2 и р. Течи за 1953–1956 гг.

3. Показано, что все расчётные результаты хорошо соответствуют имеющимся экспериментальным данным. Определены параметры источника поступления РАП из водоёма В-2 в р. Течу в зависимости от водного стока через плотину П-2. Рассмотрены экспериментальные данные о масштабах распределений УА ^{32}P по длине р. Течи в зависимости от водного стока реки.

4. Полученные результаты позволяют учесть вклад РАП в общее радиоактивное загрязнение реки и оценить возможное радиационное воздействие на население и биоту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мокров Ю.Г. Сравнительная оценка доз облучения жителей сёл Метлино и Муслюмово при пероральном поступлении ^{89}Sr , ^{140}Ba и ^{90}Sr в 1949–1951 гг. // Вопросы радиац. безопасности. – 2022. – № 1. – С. 50–64.
2. Мокров Ю.Г., Мокров К.Ю., Кизуб П.А. и др. Изучение параметров источника гамма-излучения в районе Метлинского пруда на реке Тече. Часть 1. Постановка задачи и предварительные варианты расчёты // Вопросы радиац. безопасности. – 2022. – № 3. – С. 28–41.
3. Мокров Ю.Г., Мокров К.Ю. Особенности формирования радиационной обстановки в прибрежных районах реки Течи на примере Метлинского пруда // Вопросы радиац. безопасности. – 2021. – № 4. – С. 47–61.
4. Марей А.Н., Ильин Д.И., Кардеева А.А. и др. Влияние промышленных стоков завода им. Д.И. Менделеева, сбрасываемых в р. Течу, на санитарные условия жизни и здоровье населения прибрежных пунктов: Отчёт / ЦНИЛ, ИБФ, Институт гигиены труда АМН СССР; Архив ФГУП "ПО "Маяк". – Опубликовано в // Вопросы радиац. безопасности. – 2009. – № 2. – С. 55–71.
5. О работе, выполненной Уральской экспедицией гидробиологической группы МГУ в 1958 (часть 1) и в 1961 году (часть 2): Отчёт / Строганов И.О., Совокина М.И., Следнева Л.В. и др. Архив ФГУП "ПО "Маяк". – М., 1962.
6. История завода 22. Производственное объединение "Маяк". – Озёрск, 1998. – 128 с.
7. Ильин Д.И. Миграция радиоактивных веществ из открытых водоёмов: дисс. ... д-ра техн. наук / Архив ПО "Маяк", 1956. – 270 с. – Опубликовано в // Вопросы радиац. безопасности. – 2004. – № 4. – С. 46–59; Вопросы радиац. безопасности. – 2005. – № 1. – С. 60–77; Вопросы радиац. безопасности. – 2005. – № 2. – С. 50–75; Вопросы радиац. безопасности. – 2005. – № 3. – С. 48–66; Вопросы радиац. безопасности. – 2005. – № 4. – С. 28–39.
8. О загрязнённости радиоактивными продуктами водоёмов и территории, прилегающей к ГХЗ им. Менделеева (I квартал 1954): Отчёт / ЦНИЛ – Широков В.И., Ильин Д.И., Колюбакин А.Ф. и др. Архив ФГУП "ПО "Маяк", 1954. – 47 л.
9. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика / Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. – М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2006. – 286 с.
10. О загрязнённости радиоактивными продуктами водоёмов и территории, прилегающей к ГХЗ им. Менделеева (II квартал 1954 г.): Отчёт / ЦНИЛ – Ильин Д.И., Колюбакин А.Ф., Орлова К.Н. и др. Архив ФГУП "ПО "Маяк", 1954. – 51 л.
11. Изменение с расстоянием бета- и гамма-активности воды и донных отложений р. Течи: Отчёт / ЦНИЛ – Ильин Д.И., Колюбакин А.Ф., Лупанова А.В., и др. Архив ФГУП "ПО "Маяк", 1953. – 28 л.
12. Загрязнение радиоактивными продуктами водоёмов и территории, прилегающей к Государственному ордену Ленина химическому заводу им. Д.И. Менделеева. Отчёт за I-е полугодие 1956 г.: Отчёт / ЦЗЛ ПО "Маяк", Ильин Д.И. и др. Архив ФГУП "ПО "Маяк", 1956. – 110 л.
13. Радиационный захват нейтронов: справочник / Беланова Т.С., Игнатюк А.В., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
14. Сечения пороговых реакций, вызываемых нейтронами: Справочник / Бычков В.М., Манохин В.Н., Пашенко А.Б., Пляскин В.И. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
15. Federal guidance report (FGR-15). External exposure to radionuclides in air, water and soil. External dose rate coefficients for general application / ORNL, June 2018.
16. Гидрологические ежегодники. Т. 6. Бассейн Карского моря. – Л.: Гидрометиздат, 1950–1956.

УДК 574.632:597.2/.5:[504.5:621.039(470.5)]

© 2023

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА ИХТИОФАУНУ ОБЬ-ИРТЫШСКОЙ РЕЧНОЙ СИСТЕМЫ И БЕЛОЯРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА – ВОДОЁМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

***В.Г. Городецкий, А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин
Россия, г. Екатеринбург, Институт экологии растений
и животных УрО РАН***

Выполнен сравнительный анализ мощности доз облучения рыб в р. Оби и в Белоярском водохранилище – водоеме-охладителе Белоярской АЭС. Результаты радиоэкологического мониторинга Обь-Иртышской речной системы охватывают период 2004–2017 гг., Белоярского водохранилища – с 1977 по 2019 гг. Показано, что дозовые нагрузки на ихтиофауну в р. Оби в границах Ханты-Мансийского (2004–2010 гг.) и Ямало-Ненецкого (2014–2017 гг.) автономных округов были достаточно стабильны на протяжении всего периода исследований и формировались в основном за счёт ^{90}Sr , аккумулированного в организме рыб. В Белоярском водохранилище характер формирования дозовых нагрузок на ихтиофауну во многом зависел от типов реакторов энергоблоков, работающих в этот период на Белоярской АЭС. Более высокие дозовые нагрузки были отмечены в период работы двух первых энергоблоков с реакторами АМБ-100 и АМБ-200, причём за счёт внешнего облучения от ^{137}Cs . Минимальный уровень дозовых нагрузок наблюдается в настоящее время при работе энергоблоков с реакторами БН-600 и БН-800. По мере снижения содержания ^{137}Cs во всех компонентах водоема-охладителя возросла роль ^{90}Sr и доля от внутреннего облучения, особенно у хищных видов за счёт поступления ^{90}Sr из тканей поедаемых ими рыб.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ТЕХНОГЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ, ИХТИОФАУНА, МОЩНОСТЬ ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ, ПРЕДПРИЯТИЯ РОСАТОМА, РЕКА ОБЬ, БЕЛОЯРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Источниками поступления техногенных радионуклидов в водные объекты являются глобальные выпадения из атмосферы и поступления, связанные с деятельностью предприятий ядерного комплекса, расположенных на территории водосбора этих водных объектов. Две пресноводные экосистемы, Обь-Иртышскую речную систему и Белоярское водохранилище, объединяет одно очень важное обстоятельство – оба водных объекта находятся под многолетним, постоянным воздействием предприятий ядерного топливного цикла. В 1949–1952 гг., вследствие отсутствия надлежащих технологических систем обращения с жидкими отходами радиохимического производства, с ПО "Маяк" в р. Течу, являющуюся частью Обь-Иртышской речной системы, было сброшено 100 ПБк (2,75 млн Ки) радиоактивных отходов. В ре-

зультате облучению подверглись 124 тыс. чел., проживавших в прибрежной зоне рек Течи и Исети в пределах Челябинской и Курганской областей [1]. Значительная часть радиоактивных веществ прошла транзитом по рекам Тече, Тоболу, Иртышу и Оби в Обскую губу. Другая часть (~4,6 ПБк ^{137}Cs и ~4,3 ПБк ^{90}Sr) депонирована в донных отложениях рек и их пойменных почвах [2]. В каскаде промышленных водоемов, созданных в пойменной части верховьев р. Течи после прекращения сбросов в неё отходов радиохимического производства, накоплено 350 млн м³ загрязнённой воды, являющейся по сути низкоактивными отходами с суммарной активностью около 7,4 ПБк (200 тыс. Ки). В пойме р. Течи в 18 км от плотины окончного водоема на площади 45 га, в так называемых Асановских болотах, депонировано 0,22 ПБк

(6 тыс. Ки) ^{90}Sr и ^{137}Cs . Часть этой активности ежегодно вымывается с паводковыми водами в Обь-Иртышскую речную систему [3]. Обь-Иртышская речная система также подвержена радиационному воздействию от Сибирского химического комбината, находящегося на площади водосбора р. Томи, впадающей в р. Обь. Суммарная активность радиоактивных отходов, хранящихся в подземных пластах этого предприятия, оценивается в настоящее время в 15 ЭБк (400 млн Ки) [4]. Полигоны захоронения жидких радиоактивных отходов расположены на территории санитарно-защитной зоны комбината. На этой территории находятся также и другие объекты обращения с РАО: поверхностные бассейны-хранилища, промышленные водоёмы, хранилища твёрдых отходов. Эксплуатация подземных захоронений на СХК началась в 1963 г. на экспериментальном полигоне и продолжалась до 1975–1980 гг. После этого часть скважин была выведена из эксплуатации, а на других проводились контрольные наблюдения. Общий объём захороненных РАО на экспериментальном полигоне составил около 2 млн м³.

Обь-Иртышская речная система является по-своему уникальной пресноводной экосистемой, где в силу сложившейся радиозологической ситуации имеет место как полный запрет на вылов и употребление в пищу любой рыбы из р. Течи, так и промысловый лов в промышленных объёмах на реках Иртыше и Оби. В связи с этим оценка мощности доз, получаемых рыбами от радиоактивного загрязнения р. Оби, в границах Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) и Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) имеет как научное, так и прикладное значение.

Поступление техногенных радионуклидов в водоём-охладитель обусловлено деятельностью Белоярской атомной станции. Белоярское водохранилище было образовано в 1959–1963 гг. путём зарегулирования русла р. Пышмы, протяжённость водоёма примерно 20 км, ширина до 3 км. Зеркало водохранилища имеет площадь 47 км² [5]. Жидкие сбросы АЭС могут попадать в водоём по трём каналам: промливневому, сбросному (в него направляют подогретые воды, прошедшие систему охлаждения АЭС) и обводному, дренирующему территорию во-

круг АЭС. В период с 1977 по 2019 гг. на БАЭС эксплуатировались реакторы разных типов. На первом этапе функционировали два блока с тепловыми реакторами АМБ-100 и АМБ-200. С 1989 по 2016 гг. функционировал только один энергоблок с реактором БН-600. В настоящее время работают два энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка дозовых нагрузок на основные виды рыб в Обь-Иртышской речной системе и водоёме-охладителе Белоярской АЭС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка мощности доз облучения ихтиофауны Обь-Иртышской речной системы и Белоярского водохранилища – водоёма-охладителя БАЭС выполнена на основе данных полевых и лабораторных исследований отдела континентальной радиозологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН: на Белоярском водохранилище (1977–2019 гг.), на р. Оби в границах ХМАО (2004–2010 гг.) и на территории ЯНАО (2014–2017 гг.). Использованные для расчётов данные были ранее обобщены и опубликованы в работах А.В. Трапезникова с соавторами (2014, 2016, 2018) [2, 6, 7].

Для расчёта мощности доз облучения использовалась Европейская компьютерная программа ERICA Tool (<http://www.ERICA-tool.com>) [8, 9]. Учитывались масса и размерные характеристики каждого вида рыб, преобладающие в уловах, их образ жизни – доли времени обитания вблизи дна и в толще воды (табл. 1). Исходными данными для расчётов служили содержания радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в рыбе, воде и донных отложениях (табл. 2 и 3).

На основании исходных данных выполнена оценка мощности доз облучения ихтиофауны в водоёме-охладителе БАЭС и на двух участках р. Оби: в границах ХМАО и на территории ЯНАО.

Для расчётов мощности доз облучения были взяты наиболее характерные для данных водоёмов виды рыб:

– карась обыкновенный *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758), возраст 2–3 года, придонный образ жизни, питается зоопланкто-

Таблица 1

Параметры эллипсоидов, аппроксимирующих форму рыб

Вид	Вес, кг	Параметры аппроксимирующего эллипсоида, м			Отношение времени обитания вода/дно
		длина	высота	ширина	
Карась	0,20	0,143	0,074	0,037	0,2/0,8
Лещ	0,50	0,265	0,120	0,030	0,2/0,8
Лещ*	0,75	0,32	0,051	0,022	0,1/0,9
Налим	0,50	0,37	0,060	0,043	0,2/0,8
Окунь	0,10	0,15	0,048	0,027	0,8/0,2
Окунь*	0,15	0,19	0,057	0,026	0,9/0,1
Пелядь	0,40	0,29	0,080	0,033	0,5/0,5
Плотва	0,06	0,11	0,045	0,023	0,5/0,5
Плотва*	0,1	0,17	0,053	0,035	0,5/0,5
Пыжьян	0,30	0,23	0,062	0,04	0,5/0,5
Ряпушка	0,15	0,23	0,048	0,026	0,5/0,5
Щокур	1,10	0,38	0,100	0,055	0,2/0,8
Щука	1,50	0,51	0,080	0,070	0,8/0,2
Щука*	1	0,46	0,078	0,053	0,9/0,1
Язь	0,95	0,31	0,090	0,065	0,2/0,8

Примечание. * для расчёта мощности доз у рыб Белоярского водохранилища.

Таблица 2

Среднее содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде (мБк/л) и в десятисантиметровых донных отложениях (Бк/кг) в различные периоды исследований (годы)

Среда	Радионуклид	Белоярское водохранилище			Обь, ХМАО	Обь, ЯНАО
		1977–1989	2011–2014	2016–2019	2004–2010	2014–2017
Вода	^{90}Sr	61±22	17±5	16±3	45±8	11,2±1,3
	^{137}Cs	310±60	12±4	9±2	3,26±0,76	7,8±1,5
Донные отложения	^{90}Sr	22,4±6	36±8	21±6	8,04±2,15	13,7±1,6
	^{137}Cs	1490±165	127±17	30±7	0,98±0,39	4,7±1,4

ном, зоо- и нектобентосом, водорослями, тело короткое, сжатое с боков;

– лещ *Abramis brama* (L., 1758), возраст 3–5 лет, придонный образ жизни, питается зообентосом, сравнительно крупная рыба с высоким телом, сжатым с боков;

– налим *Lota lota* (L., 1758), возраст 3–5 лет, придонный образ жизни, питается рыбой и мелкими беспозвоночными, тело удлинённо-округлое в передней части;

– окунь речной *Perca fluviatilis* (L., 1758), возраст 2–3 года, питается рыбой, беспозвоночными, тело сжато с боков;

– пелядь (сырок) *Coregonus peled* (Gmelin, 1789), возраст 2–3 года, питается зоо- и нектобентосом, зоо- и фитопланктоном, тело высокое, сжато с боков, полупроходная рыба;

– сиг обыкновенный (пыжьян) *Coregonus lavaretus* (L., 1758), возраст 4–6 лет, питается бентосом и нектобентосом, тело удлинённое, уплощённое с боков, полупроходная рыба;

– плотва *Rutilus rutilus* (L., 1758), возраст 3–5 лет, питается зоопланктоном, зообентосом, водорослями и гидрофитами, тело несколько сжато с боков;

– ряпушка сибирская *Coregonus sardinella*

Таблица 3

Содержание радионуклидов в рыбе (Бк/кг) в различные периоды исследований (годы)

Вид	Белоярское водохранилище						Обь, ХМАО		Обь, ЯНАО	
	1977–1989		2011–2014		2016–2019		2004–2010		2014–2017	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Карась	–	–	–	–	–	–	5,9±2,2	6,9±2,4	1,5±0,2	1,1±0,3
Лещ	50±18	3,7±2,1	2,6±1,2	3±2	1,5±0,6	9±3,5	0,6±0,3	13,6±4,1	–	–
Налим	–	–	–	–	–	–	0,4±0,2	4,7±1,8	–	–
Окунь	–	–	4,1±2,1	2,6±1,5	2,4±1,1	3,1±1,4	1,8±1,3	25±7	2,7±0,5	5,4±0,7
Пелядь	–	–	–	–	–	–	0,3±0,2	2,5±1,1	2,3±0,6	11±4
Плотва	155±65	4,5±1,4	3±1	3,4±1,2	1,7±0,5	7,5±2,8	0,3±0,2	3,8±1,8	1,4±0,3	3,3±0,3
Пыжьян	–	–	–	–	–	–	–	–	0,9±0,4	9±6
Ряпушка	–	–	–	–	–	–	–	–	0,6±0,1	2,4±0,6
Щокур	–	–	–	–	–	–	–	–	1,1±0,1	3,4±0,7
Щука	133±45	2,1±0,8	4,7±1,9	25±8	0,8±0,4	25,1±9	1,6±0,7	3±1	2,4±0,5	7,3±1,5
Язь	–	–	–	–	–	–	0,4±0,2	8,1±3,3	1,8±0,5	5,5±1,5

Таблица 4

Мощность доз облучения и критерии формирования общей дозы у основных видов рыбы р. Оби в границах ХМАО (2004–2010 гг.)

Вид	Общая доза, нГр/сут	Отношение внутренней дозы к общей дозе, %	Доля ¹³⁷ Cs в формировании суммарной дозы облучения, %
Карась	130±35	96	18
Лещ	336±164	99	1
Налим	64±15	96	6
Окунь	525±202	100	2
Плотва	90±16	95	4
Щука	81±18	98	12
Язь	188±63	98	2

(Valenciennes, 1848), возраст от 4 до 6 лет, питается преимущественно зоопланктоном, тело вытянутое, сельдеобразное;

– чир (щокур) *Coregonus nasus* (Pallas, 1776), возраст 5–7 лет, типичный бентофаг, тело высокое, уплощённое с боков, полупроходная рыба;

– щука обыкновенная *Esox lucius* (L., 1758), возраст 3–6 лет, питается рыбой, тело удлинённое, торпедообразное, несколько сжатое с боков;

– язь *Leuciscus idus* (L., 1758), возраст 5–7 лет, питается зообентосом, тело умеренно удлинённое, овальное.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обь-Иртышская речная система

В табл. 4 представлены расчётные данные мощности доз облучения для основных видов рыб, отловленных в р. Оби на территории ХМАО. Также показаны основные критерии формирования общей дозы облучения в виде процентного соотношения внутренней и внешней дозы и вклад ¹³⁷Cs в формирование суммарной дозы облучения. Следует отметить, что полученные значения суммарной мощно-

сти доз облучения от ^{90}Sr и ^{137}Cs у всех исследуемых видов рыб Оби на территории ХМАО существенно ниже безопасного уровня, равного 1 мГр/сут [10].

Общая дозовая нагрузка на рыб р. Оби в значительной степени была сформирована за счёт внутреннего облучения, а основным дозобразующим элементом являлся ^{90}Sr .

Доля внутреннего облучения в общей дозе у разных видов рыб составила от 95 % у карася до 100 % у окуня. Доля вклада ^{137}Cs в общую дозу облучения была не велика и составляла от 18 % у карася и еще ниже у всех остальных видов рыб.

В табл. 5 представлены аналогичные данные, только уже для участка р. Оби, расположенного в границах ЯНАО. Перечень основных видов рыб дополнен характерными видами, обитающими в нижней Оби (пелядь, пыжьян, ряпушка, щокур).

Как и в предыдущем случае, значения мощности доз облучения у всех видов исследуемых рыб существенно ниже безопасных уровней – 1 мГр/сут [10].

В количественном отношении показатели мощности доз облучения у аналогичных видов рыб в р. Оби на территориях ХМАО и ЯНАО отличаются несущественно, все величины примерно одного порядка. Исключением может быть уровень дозовой нагрузки у окуня. Так, если для окуня из Оби на территории ХМАО уровень дозы был равен 525 нГр/сут, то для окуня в границах ЯНАО – 93 нГр/сут. Доля внутренней дозы облучения в суммарной дозе у

рыб р. Оби в границах ХМАО также преобладала над внешней и составила для разных видов рыб от 64 до 98 %. Более высокие показатели дозы от внутреннего облучения были отмечены у щуки – 98 %, у пеляди – 96 %, у окуня – 95 %. Доля ^{137}Cs в формировании суммарной дозы облучения у ихтиофауны р. Оби на участке в ЯНАО составляла от 7 до 30 %.

Белоярское водохранилище – водоём-охладитель БАЭС

В табл. 6. представлены суммарные мощности доз облучения у основных видов рыб, обитающих в Белоярском водохранилище. Изменения дозовых нагрузок на ихтиофауну водоёма-охладителя совпадают с периодами работы реакторов разных типов на Белоярской АЭС. Период 1977–1989 гг. совпадает с работой двух первых энергоблоков с тепловыми реакторами АМБ-100 и АМБ-200. В 2011–2014 гг. функционировал только один энергоблок с реактором БН-600. В 2016 г. был введён в эксплуатацию энергоблок с реактором БН-800 и до настоящего времени работают два энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800.

Наибольшие дозы облучения рыб водоёма-охладителя БАЭС отмечали в 1977–1989 гг. при работе первых двух энергоблоков с тепловыми реакторами АМБ-100 и АМБ-200. Мощность дозы облучения варьировала в интервале от 1000 нГр/сут у щуки до 3822 нГр/сут у леща. При этом даже максимальные дозы облучения

Таблица 5
Мощность доз облучения и критерии формирования общей дозы у основных видов рыбы
нижней Оби в границах ЯНАО (2014–2017 гг.)

Вид	Общая доза, нГр/сут	Отношение внутренней дозы к общей дозе, %	Доля ^{137}Cs в формировании суммарной дозы облучения, %
Окунь	93±11	95	15
Пелядь	171±57	96	7
Плотва	63±5	86	20
Пыжьян	136±77	90	10
Ряпушка	57±6	64	30
Щокур	66±9	86	21
Щука	124±25	98	11
Язь	99±23	88	19

в этот период не превышали рекомендуемый Международной комиссией по радиологической защите безопасных уровней – 1 мГр/сут [10].

После вывода из эксплуатации первых двух энергоблоков с реакторами АМБ-100 и АМБ-200 отмечено существенное снижение дозовых нагрузок на ихтиофауну. В период с 2011–2014 гг. дозовые нагрузки по сравнению с первым этапом снизились у плотвы в 11,2 раза, у леща – в 10,4 раза, у щуки в – 2,3 раза.

Ввод в эксплуатацию энергоблока с реактором БН-800 не оказал отрицательного влияния на радиоэкологическую ситуацию на Белоярском водохранилище, дозовые нагрузки на ихтиофауну водоёма продолжали снижаться. В 2016–2019 гг. наиболее значимое снижение отмечено у свободноживущего карпа – в 3,8 раза, леща – в 1,7 раза, плотвы – в 1,5 раза. У остальных видов также было отмечено снижение уровня дозовых нагрузок: у окуня – на 29,2 %, у щуки – на 9,2 %.

По мере очищения водоёма-охладителя – снижения содержания техногенных радионуклидов во всех компонентах водоёма, произошло смещение дозовых нагрузок с рыб эврифагов (плотва, лещ) на ихтиофагов (окунь, щука). Формирование дозовых нагрузок у рыб эврифагов ("мирные виды") в большей степени зависит от внешней среды, в первую очередь – от донных отложений. Ихтиофаги (хищные виды) являются конечным звеном трофической цепи в пресноводной экосистеме, источником поступления радионуклидов в организм являются ткани других рыб, входящих в их рацион. Поэтому формирование дозовой нагрузки ихтиофагов происходит в основном за счёт внутренней дозы (табл. 7). Доза внутреннего облучения у щуки составила 98 % от общей дозы, у окуня – 94 %.

На первом этапе (1977–1989 гг.) общая доза облучения всех представленных видов рыб была сформирована в основном за счёт ^{137}Cs (табл. 8). На долю ^{90}Sr в общей дозе приходилось не более 2–3 %. По мере снижения поступления ^{137}Cs в водоём-охладитель его вклад в формирование дозы облучения значительно уменьшился, преобладающим элементом в общей мощности дозы становится ^{90}Sr . Особенно наглядно это прослеживается у рыб ихтиофа-

Таблица 6

Суммарная мощность дозы облучения основных видов рыб водоёма-охладителя на разных этапах работы Белоярской АЭС, нГр/сут

Вид	Период, годы		
	1977–1989	2011–2014	2016–2019
Плотва	2743±1146	245±52	160±48
Лещ	3822±1456	367±61	215±64
Окунь	–	89±17	63±20
Щука	1000±260	423±112	384±88

Таблица 7

Отношение внутренней дозы к общей дозе облучения ихтиофауны водоёма-охладителя БАЭС, %

Вид	Период, годы		
	1977–1989	2011–2014	2016–2019
Плотва	24	24	79
Лещ	7	15	64
Окунь	–	59	94
Щука	61	92	98

Таблица 8

Доля ^{137}Cs в формировании суммарной дозы облучения ихтиофауны водоёма-охладителя БАЭС, %

Вид	Период, годы		
	1977–1989	2011–2014	2016–2019
Плотва	97	77	30
Лещ	98	85	36
Окунь	–	57	14
Щука	97	13	3

гов. Так, доля ^{137}Cs в формировании суммарной дозы облучения у щуки снизилась с 97 до 3 %, у окуня – с 57 до 14 %.

Сравнительная оценка дозовых нагрузок на рыб в Обь-Иртышской речной системе и водоёме-охладителе Белоярской АЭС

Важным отличительным фактором при формировании дозовых нагрузок на ихтио-

фауну водоёма-охладителя является чётко выраженная стадийность, совпадающая по времени с работой энергоблоков с разными типами реакторов на Белоярской АЭС, чего не наблюдается в Обь-Иртышской речной системе. Радиоэкологические исследования Обской речной системы, включающие изучение ихтиофауны, проводились также на протяжении достаточно большого промежутка времени: в границах ХМАО – в период 2004–2010 гг., на территории ЯНАО – в период 2014–2017 гг. При этом был получен существенный массив данных для расчёта дозовых нагрузок на ихтиофауну. Полученные результаты имели определённые колебания, но связать их с временными отрезками, как на Белоярском водохранилище, не представляется возможным. Большинство полученных значений дозовых нагрузок, даже на разных участках р. Оби, были сопоставимы между собой и не зависели от времени исследования.

Обращает на себя внимание существенная разница в уровне значений суммарной дозы облучения ихтиофауны в Белоярском водохранилище на начальных этапах исследований по сравнению с аналогичными данными в р. Оби. Суммарная мощность дозы облучения в водоёме-охладителе в период 1977–1989 гг.

на порядок величины была выше, чем наши первые результаты по Обской системе в период 2004–2011 гг. Значения мощности дозы в двух водных экосистемах полностью выровнялись и стали сопоставимы между собой только к третьему этапу исследований водоёма-охладителя, охватывающему период 2016–2019 гг. (рис. 1).

Также отмечено, что основным дозообразующим элементом для ихтиофауны Обской речной системы за весь период исследований являлся ^{90}Sr . В Белоярском водохранилище на первых этапах исследований на долю ^{90}Sr приходилось всего лишь 2–3 % от суммарной дозы облучения, а основным дозообразующим элементом тогда был ^{137}Cs . До 93 % общей дозовой нагрузки некоторые виды рыб водоёма-охладителя получали за счёт внешней дозы от воды и донных отложений. Столь значительная разница по уровню влияния на ихтиофауну водоёма ^{137}Cs и ^{90}Sr объясняется тем, что последний практически не сбрасывался в водоём-охладитель с атомной станции, а имел в основном глобальное происхождение. Напротив, ^{137}Cs мог поступать в водоём-охладитель по трём открывающимся техническим каналам: промливновому, сбросному и обводному. Ситуация стала меняться после остановки и вывода из эксплуатации двух первых энергоблоков с тепловыми

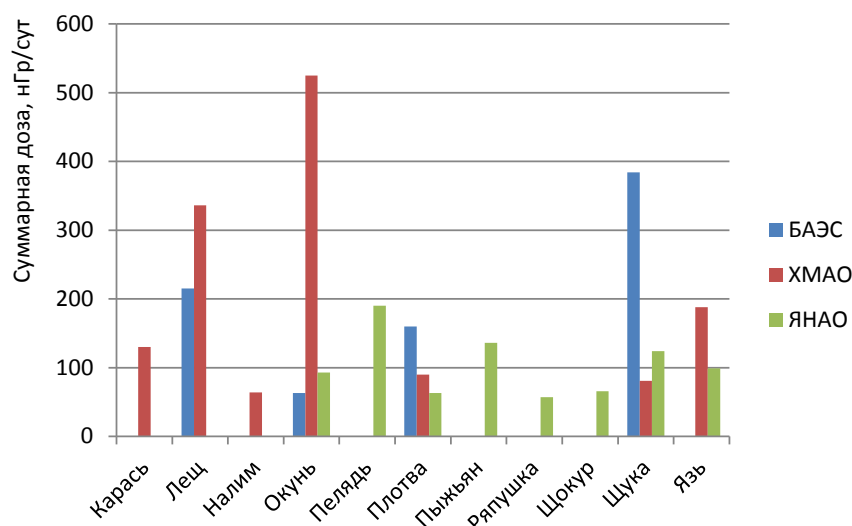


Рис. 1. Суммарная мощность дозы облучения основных видов рыб в р. Оби и Белоярском водохранилище

реакторами АМБ-100 и АМБ-200. Содержание ^{137}Cs во всех компонентах водоёма-охладителя постепенно снизилось до уровня глобальных выпадений, после чего, как и в Обь-Иртышской речной системе, ведущую роль в формировании дозы облучения ихтиофауны стал играть ^{90}Sr и в первую очередь у хищных видов рыб: у щуки и окуня (рис. 2). Достаточно стабильная и ведущая роль ^{90}Sr в формировании дозовых нагрузок на ихтиофауну р. Оби могла быть обусловлена также и внешними факторами. В формировании мощности дозы облучения ихтиофауны р. Оби, кроме глобальных выпадений ^{90}Sr , с большой долей вероятности мог участвовать ^{90}Sr , поступивший в речную систему в результате сбросов с ПО "Маяк", а также с ранее загрязнённых территорий. Известно, что ^{137}Cs и ^{90}Sr в пресноводных экосистемах обладают разными миграционными характеристиками. В отличие от ^{90}Sr , ^{137}Cs легко сорбируется и удерживается донными отложениями и пойменными почвами. Высокая миграционная подвижность ^{90}Sr в речных системах обеспечивается его хорошей растворимостью в воде и слабым удержанием донными отложениями и пойменными почвами, что обеспечивает его динамическое равновесие в воде путём постоянного обмена между водной средой и естественным депо в поймен-

ных почвах и донных отложениях на всём протяжении речной системы. Подобный эффект был ранее нами показан на примере участка нижней Оби в границах ЯНАО, общей протяжённостью около 431 км, включая 171 км выше по течению от г. Лабытнанги и 260 км ниже по течению [11]. Проведённые исследования показали, что характер распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs на обследованном участке существенно различался. Удельная активность ^{90}Sr в воде носила постоянный горизонтальный тренд вдоль течения реки на уровне $0,015 \pm 0,005$ Бк/л. Это подтверждает, что почти весь радиоактивный стронций, поступающий по Оби, находился в установившемся динамическом равновесии с запасами в пойме, транзитом проходил весь протяжённый участок нижней Оби и практически без потерь переносился в Обскую Губу. Объёмная активность ^{137}Cs , напротив, монотонно уменьшалась на всём протяжении исследованного участка, снижаясь в 12 раз. Аналогичные результаты, подтверждающие возможность миграции ^{90}Sr с водой по р. Оби на большие расстояния, были получены на протяжённом участке реки между ХМАО и ЯНАО [2]. Так, средний годовой сток в створе, расположенном в 65 км ниже слияния Иртыша с Обью, составил по ^{90}Sr $5,09 \cdot 10^{12}$ Бк, а в створе, расположенном в 10 км

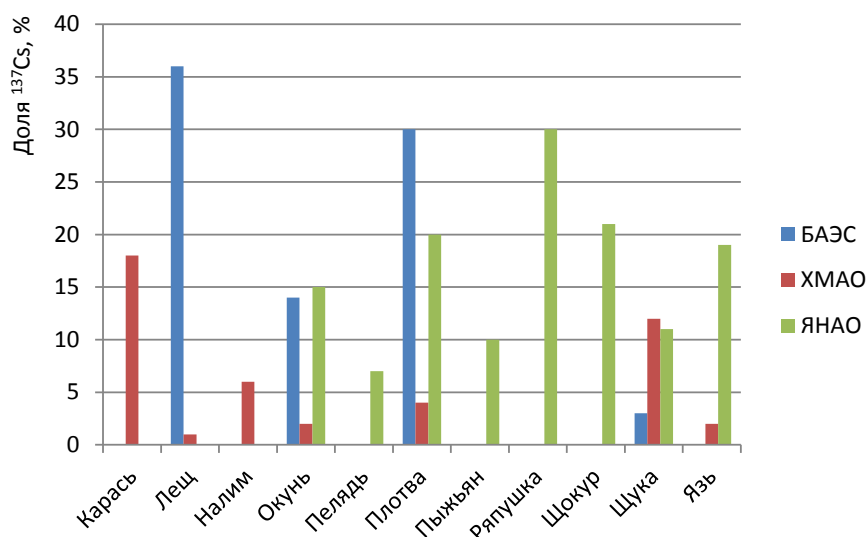


Рис. 2. Доля ^{137}Cs в формировании суммарной дозы облучения в р. Оби и Белоярском водохранилище, %

выше г. Лабитнанги, годовой сток был равен $5,0 \cdot 10^{12}$ Бк, то есть какое количество ^{90}Sr в течение года выносилось из ХМАО – практически столько же поступало на территорию ЯНАО.

Попадая с кормом и водой в организм рыб, ^{90}Sr аккумулируется в костной ткани, замещая кальций, надолго обеспечивая внутреннюю дозу облучения. Данная закономерность свойственна как для рыб водоёма-охладителя, так и для ихтиофауны реки Оби (рис. 3). Особенно это наглядно проявляется на примере хищных рыб (окунь, щука) у которых доля внутреннего облучения может достигать до 98–100 %. Поскольку хищные рыбы являются конечным звеном трофической цепи в пресноводной экосистеме, источником поступления радионуклидов в организм для них являются ткани других рыб, входящих в их рацион питания.

ВЫВОДЫ

1. Выполнен сравнительный анализ формирования дозовых нагрузок на ихтиофауну в р. Оби и Белоярском водохранилище – водоёме-охладителе Белоярской АЭС. Результаты радиоэкологического мониторинга Обь-Иртышской речной системы охватывают период 2004–2017 гг., Белоярского водохранилища – с 1977

по 2019 гг. Значения мощности доз облучения у всех исследованных видов рыб были ниже безопасного уровня – 1 мГр/сут.

2. Отличительной особенностью при формировании дозовых нагрузок на ихтиофауну Белоярского водохранилища является зависимость от типов реакторов, функционирующих в данный период на Белоярской АЭС. Более высокие дозовые нагрузки были отмечены в период работы первых двух энергоблоков с реакторами АМБ-100 и АМБ-200, причём за счёт внешнего облучения от ^{137}Cs . Минимальный уровень дозовых нагрузок наблюдается в настоящее время при работе энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800.

3. По мере очищения Белоярского водохранилища и снижения содержания техногенных радионуклидов во всех компонентах водоёма одновременно наблюдается уменьшение дозовых нагрузок на все виды рыб. В настоящее время в водоёме-охладителе действуют естественные процессы самоочищения, направленные на установление равновесия в распределении радионуклидов между компонентами экосистемы Белоярского водохранилища.

4. Дозовые нагрузки на ихтиофауну в р. Оби в границах ХМАО (2004–2010 гг.) и ЯНАО (2014–2017 гг.) носили более стабиль-

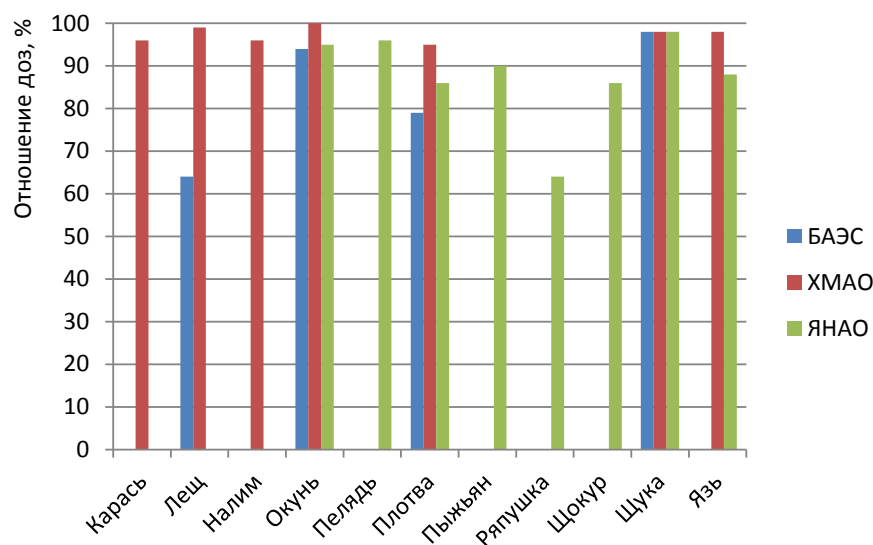


Рис. 3. Отношение внутренней дозы к общей дозе облучения в р. Обь и Белоярском водохранилище, %

ный характер на протяжении всего периода исследований и были обусловлены в основном ^{90}Sr , аккумулированным в организме рыб.

5. По мере увеличения роли ^{90}Sr в формировании мощности общей дозы облучения, начинает преобладать значение дозы от внутреннего облучения. Попадая в организм рыб, ^{90}Sr аккумулируется в костной ткани, замещая кальций, надолго обеспечивая внутреннюю дозу облучения. Особенно это проявляется у хищных видов за счёт поступления ^{90}Sr из тканей поедаемых ими рыб. Доля внутреннего облучения у таких видов, как окунь и щука может достигать до 98–100 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУ Института экологии растений и животных УрО РАН, тема № 122021000077-6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Заключение комиссии по оценке экологической ситуации в районе деятельности ПО "Маяк" Минатомэнергопрома СССР, организованной распоряжением президиума АН СССР № 1140-501 от 12.06.1990 г.
2. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. – Т. 1. – Екатеринбург: Изд-во "АкадемНаука", 2014. – 496 с.
3. Заключение комиссии под председательством вице-президента АН СССР О.М. Нефедова, организованной распоряжением Президента СССР № РП-1283 от 3 января 1991 г., по экологической и радиоэкологической обстановке в Челябинской области".
4. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. – М.: ИздАТ, 2010. – 496 с.
5. Ленченко В.Г., Сажина Л.А., Шилкова Е.В. Материалы XIII научн. сессии Свердловского НИИ гигиены труда и профпатологии. – Свердловск, 1964. – С. 102–106.
6. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. – Т. 2. – Екатеринбург: Изд-во "АкадемНаука", 2016. – 480 с.
7. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. – Т. 3. – Екатеринбург: Изд-во "АкадемНаука", 2018. – 304 с.
8. Brown J.E., Alfonso B., Avila R. et al. The ERICA tool // J. Environment. Radioactivity. – 2008. – V. 99 (9). – P. 1371–1383.
9. Brown J., Alfonso B., Avila R. et al. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals // J. Environment. Radioactivity. – 2016. – V. 153. – P. 141–149.
10. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants // ICRP Publication 108. – Ann, ICRP, 2008. – V. 38. – No. 4-6. – 242 p.
11. Трапезников А.В., Николкин В.Н., Коржавин А.В., Трапезникова В.Н. Распределение радионуклидов в воде, донных отложениях и пойменных почвах нижней Оби в границах Ямало-Ненецкого автономного округа // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2018. – Т. 58. – № 4. – С. 406–414.

УДК 57.085.23

© 2023

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСониФИЦИРОВАННОЙ РЕАКЦИИ ГСК ЧЕЛОВЕКА НА ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ IN VIVO

*Н.И. Атаманюк^{1,2}, Е.В. Стяжкина^{1,2}, А.А. Перетыкин¹, Н.А. Обвинцева¹,
С.С. Андреев¹, А.Е. Алдибекова¹, Г.А. Тряпицына^{1,2}, Е.А. Пряхин¹*

*¹Россия, г. Челябинск, ФГБУН Уральский научно-практический
центр радиационной медицины ФМБА России*

*²Россия, г. Челябинск, ФГБОУ ВО "Челябинский
государственный университет"*

Оценка персонифицированной радиочувствительности является важной задачей для целей радиационной защиты профессионалов и для минимизации развития радиационно-индуцированных осложнений со стороны здоровых тканей при лучевой терапии. Разработана экспериментальная модель для оценки персонифицированной реакции ГСК человека на ионизирующее излучение. Модель оценки персонифицированной реакции на облучение включает выделение ГСК из периферической крови методом иммуномагнитной сепарации, внутрикостное введение ГСК в большую бедренную кость мышам с тяжёлым комбинированным иммунодефицитом (например, NOD SCID), облучение животных сразу после трансплантации клеток, измерение доли ГСК (CD45^{low}CD34⁺ клеток) среди всех лейкоцитарных (CD45^{low/+}) клеток человека в большой берцовой кости на 3-и и 14-е сут после облучения; расчёт отношения доли ГСК на 14-е сут к этому показателю на 3-и сут (коэффициент $K_{14/3}$). Модель позволяет зарегистрировать индивидуальные отличия данного показателя. Более высокое значение коэффициента ассоциировано с более высокой радиорезистентностью.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ГЕМОПОЭТИЧЕСКИЕ СТВОЛОВЫЕ КЛЕТКИ, ОСТРЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ СИНДРОМ, ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, ГУМАНИЗИРОВАННЫЕ МЫШИ

Развитие персонифицированной медицины является одним из приоритетных направлений научно-технологического развития России. В части радиационной медицины и радиобиологии человека данное направление связано с оценкой индивидуальной радиочувствительности, прогнозом персонифицированных тканевых реакций на радиационное воздействие и персонифицированной оценкой риска отдалённых последствий радиационного воздействия.

Имеются индивидуальные особенности в реакции на ионизирующее излучение, которые могут проявляться в виде разной выживаемости облучённых организмов при остром облучении, разной тяжести тканевых реакций, разной способности клеток репарировать повреждения

ДНК, в развитии неблагоприятных отдалённых последствий [1–4].

Оценка таких индивидуальных особенностей радиочувствительности является важным фактором в подборе персонала на предприятиях с ядерным производственным циклом, в будущем – для подбора персонала для длительных межпланетных перелётов. В настоящее время эта проблема является важной в планировании лучевой терапии для минимизации развития радиационно-индуцированных осложнений со стороны здоровых тканей [5, 6].

В настоящее время существуют различные подходы к оценке индивидуальной радиочувствительности, которые преимущественно направлены на оценку субклеточных или

клеточных реакций на острое радиационное воздействие *in vitro* или выявление связи между генетическими или физиологическими особенностями, которые могут выступать маркерами, предикторами детерминированных или стохастических реакций на облучение [2, 4, 7, 8]. Подходы, основанные на оценке персонифицированных тканевых реакций на технологиях *in vitro*, в ряде случаев оказываются эффективными (например, для прогноза тканевых реакций здоровых тканей при лучевой терапии), однако не всегда имеют возможность учесть все процессы, связанные с восстановлением облучённых тканей, сохранением клоногенной активности стволовых клеток, влиянием комплекса гуморальных факторов и клеточных взаимодействий в целом организме [6, 7]. Использование генов-предикторов или маркеров радиочувствительности оказывается эффективным, если вариант конкретного гена оказывает сильное воздействие на радиочувствительность (например, дефект гена репарации ДНК), но эффективность восстановления облучённых клеток может также быть ассоциирована не с одним геном, а быть полигенным признаком, определяющимся слабыми эффектами множества генов.

Гемопозитические стволовые клетки (ГСК) являются одними из самых радиочувствительных клеток организма человека и существенным образом определяют тяжесть и исходы костномозговой формы острого радиационного синдрома, эффектов хронического радиационного воздействия [9–11]. Изучение их реакции на радиационное воздействие представляется важной задачей с точки зрения определения индивидуальной персонифицированной реакции на радиационное воздействие.

Такая информация может быть получена с использованием технологий *in vitro*. Но более полную информацию с учётом клоногенной активности ГСК, их способности к репопуляции и дифференцировке можно получить *in vivo* в модели ксенотрансплантации ГСК иммунодефицитным животным [12–14].

Цель работы – разработка экспериментальной модели оценки индивидуальных реакций ГСК периферической и пуповинной крови человека на облучение после их трансплантации мышам с тяжёлым комбинированным иммунодефицитом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Животные. ГСК человека вводили мышам с тяжёлым комбинированным иммунодефицитом линии NOD SCID (SPF-виварий ИЦиГ СО РАН, г. Новосибирск). Животных содержали в SPF-условиях, на стандартном рационе, без ограничения подачи корма и питьевой воды. Работы с животными выполнены с соблюдением норм гуманного обращения с экспериментальными животными (Директива 2010/63/EU Европейского парламента и Совета Европейского союза от 22.09.2010).

ГСК человека. Животным вводили ГСК из периферической крови и пуповинной крови. Пуповинную кровь после получения добровольного информированного согласия отбирали в ГБУЗ Областной Перинатальный Центр г. Челябинска. Для получения ГСК периферической крови использовали продукт периферической донорской крови – лейкотромбослой, изготовленный ГБУЗ Станция переливания крови ФМБА России в г. Челябинске.

ГСК выделяли из крови методом позитивной иммуномагнитной сепарации с помощью технологии EasySep с использованием набора EasySep Human Cord Blood CD34 Positive Selection Kit II (Stem Cell Technologies, Канада), манипуляции проводили согласно инструкции производителя. ГСК идентифицировали как CD45^{low}CD34⁺ клетки и подсчитывали их количество методом проточной цитометрии на цитометре Accuri C6 (BD Biosciences, США).

Методы получения гуманизированных животных. Животных гуманизировали тремя разными способами. В первой модели мышам вводили ГСК пуповинной крови внутривенно в боковую хвостовую вену после предварительного острого внешнего γ -облучения в дозе 2,5 Гр. Дальнейшие работы с животными в этой модели проводили через девять недель после трансплантации ГСК, в течение которых стволовые клетки человека заселяли в костный мозг мышей и формировали там пул самоподдерживающихся стволовых клеток и дифференцирующиеся кроветворные клетки. В модели использованы ГСК, полученные от 12 доноров. Клетки от каждого донора делили на 3–5 равных частей для введения нескольким мышам. При этом количество трансплантируе-

мых клеток составляло от 30 до 200 тысяч.

Через девять недель гуманизированных мышей подвергали острому внешнему γ -облучению в дозах 0,5, 1,0 или 1,5 Гр, оставляя необлучённым одно животное для каждого донора клеток. Через 3 и 14 сут после облучения у мышей извлекали костный мозг из бедренной кости для подсчёта числа человеческих и мышинных клеток.

Клетками трёх доноров были гуманизированы дополнительно по две мыши, которым за 30 мин до облучения внутривенно вводили радиопротектор – цистеамин в дозе 200 мг/кг массы тела.

Облучение проводили на исследовательской радиобиологической гамма-установке ИГУР-1М (^{137}Cs -источники, мощность дозы 0,91 Гр/мин, неравномерность гамма-поля не более 5 %).

Во второй модели использовали ГСК периферической крови. Эти клетки неспособны к длительной репопуляции в костном мозге гуманизированных мышей, но способны сохраняться после трансплантации не менее 14 сут [15]. Поэтому в данной модели экспериментальное облучение клеток человека происходило одновременно с трансплантацией ГСК. Клетки вводили в канал большой берцовой кости, для процедуры использовали изофлуранный наркоз. Клетки от одного донора делили на четверых мышей (всего девять доноров), вводили от 30 до 115 тыс. клеток на каждое животное. При этом двух мышей облучали за 30 мин до трансплантации клеток (ГСК человека без облучения), а двух мышей, получивших клетки от того же донора, облучали через 30 мин после введения ГСК (человеческие клетки облучены). Облучение проводили в дозах 0,5, 1,0 и 1,5 Гр (по три донора на каждую дозу). Через 3-и и 14 сут после облучения у животных извлекали большую берцовую кость, в которую проводилась посадка клеток, для получения костного мозга (для каждого срока – одна мышь с необлучёнными ГСК человека и одна – с получившими облучение клетками).

В третьей модели проводили эксперимент по схеме, описанной для ГСК периферической крови, однако использовали ГСК пуповинной крови (всего девять доноров).

Измерение числа клеток человека и

мышь. Идентификацию клеток человека и мыши проводили методом проточной цитометрии на цитометре Accuri C6 (BD Biosciences, США). Окрашивали и подсчитывали в костном мозге, полученном из бедренной или большой берцовой кости, количество мышинных лейкоцитарных CD45^+ клеток с помощью моноклональных крысиных антител антиCD45-PE, клон 30-F11 (BD Pharmingen, США); количество человеческих лейкоцитарных CD45^+ клеток с помощью моноклональных мышинных антител антиCD45-FITC, клон HI30 (Stem Cell Technologies, Канада); количество человеческих стволовых $\text{CD45}^{\text{low}}\text{CD34}^+$ клеток с помощью моноклональных мышинных антител антиCD34-APC, клон 581 (Stem Cell Technologies, Канада). Для предотвращения неспецифического ложноположительного окрашивания клеток использовали блокаторы Fc-рецепторов мыши Mouse BD Fc Block CD16/CD32 (BD Pharmingen) и блокатор Fc-рецепторов человека Human BD Fc Block (BD Pharmingen). Рассчитывали количество клеток в 1 мл суспензии, полученной из одной кости.

У контрольных необлучённых животных в каждой модели также измеряли содержание CD45^+ клеток человека в периферической крови (в пересчёте на 1 мл) и селезёнке (в пересчёте на орган).

В CD45^+ клетках человека в костном мозге гуманизированных животных измеряли интенсивность флуоресценции γH2AX , маркера двунитевых разрывов ДНК, рассматриваемого как один из молекулярно-генетических предикторов эффектов облучения [8, 16, 17]. Для этого проводили фиксацию и пермеабиллизацию клеток с помощью набора BD Cytotfix/Cytoperm Fixation/Permeabilization Kit (BD Biosciences) в соответствии с руководством производителя. Клетки фиксировали 4 % раствором параформальдегида, для сохранения проницаемости мембран клеток для антител использовали BD Perm/Wash Buffer. Окраску клеточных суспензий и анализ проводили в течение 72 ч после фиксации клеток.

Интенсивность флуоресценции фокусов γH2AX измеряли после окраски клеток моноклональными мышинными антителами anti-H2AX AlexaFluor 647 (pS139) (BD Biosciences), а также антителами к мышинным CD45-PE и к

человеческим CD45-FITC. Кроме антител, для идентификации популяции исследуемых клеток использовали интеркалирующий в цепь ДНК краситель 7-AAD (BD Pharmingen), который при окрашивании пермеабилizированных клеток позволяет дифференцировать по размеру и количеству ДНК ядросодержащие клетки от дебриса и фрагментов костномозговой стромы.

Мерой количества фокусов γ H2AX служило среднее значение флуоресценции антител AlexaFluor 647 Mouse anti-H2AX в популяции CD45⁺ клеток человека. Для стандартизации показателей интенсивности флуоресценции к каждой пробе добавляли суспензию бусин High Control Beads (TruCount) с постоянным показателем флуоресценции.

Во всех моделях рассчитывали следующие показатели: отношение числа CD45^{low}CD34⁺ и CD45⁺ клеток через 3 и 14 сут после облучения к числу клеток того же донора без облучения (выживаемость клеток на 3-и сут, относительное количество клеток на 14-е сут). Рассчитывали процентное содержание ГСК от общего количества всех CD45^{low/+} клеток человека для каждой гуманизированной мыши. Также определяли коэффициент, равный отношению доли ГСК на 14-е сут после облучения к доле ГСК на 3-и сут после облучения ($K_{14/3}$). Определяли относительную интенсивность флуоресценции γ H2AX в CD45⁺ клетках человека по отноше-

нию к этому показателю без облучения у соответствующего донора ГСК.

Статистическая обработка данных. Для измеренных показателей определяли среднее значение и стандартную ошибку. Описывали зависимость изучаемых показателей от дозы методом регрессионного анализа. Для оценки радиочувствительности ГСК рассчитывали по результатам регрессионного анализа выживаемости ГСК через 3 сут после облучения величину D_0 – дозу, при которой выживает 37 % клеток от их исходного количества, и её 95% доверительный интервал. Сравнивали показатели разных моделей с использованием t-критерия Стьюдента, отличия принимали значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики моделей. В табл. 1 приведены данные о приживаемости клеток человека после ксенотрансплантации ГСК в разных моделях – количестве клеток человека в органах и тканях гуманизированных мышей. Поскольку всем животным вводили разное количество клеток человека, для сравнения моделей результаты выражены в количестве клеток, стандартизованном на 100 тыс. введенных ГСК человека.

Как видно из табл. 1, модель, предполага-

Таблица 1

Содержание клеток человека в органах гуманизированных мышей

Экспериментальная модель	Время после трансплантации	Кровь, тыс. CD45 ⁺ клеток/мл	Селезёнка, тыс. CD45 ⁺ клеток/орган	Костный мозг, тыс. клеток/кость*	
				CD34 ⁺	CD45 ⁺
ГСК пуповинной крови, внутривенное введение мышам NOD SCID	9 недель	19±7	420±170	330±170	990±380
ГСК периферической крови, введение в костномозговой канал большой берцовой кости мышам NOD SCID	3 сут	7,7±1,6	10,8±3,5	0,9±0,2	5,5±1,8
	14 сут	12±5	22±10	0,7±0,2	5,3±2,3
ГСК пуповинной крови, введение в костномозговой канал большой берцовой кости мышам NOD SCID	3 сут	18,5±4,3	11,7±0,4	0,6±0,3	3,2±0,4
	14 сут	25,4±1,4	26,6±4,1	2,6±1,5	10,5±3,5

Примечание: * – в модели внутривенного введения ГСК пуповинной крови подсчитывали количество клеток в костном мозге из бедренной кости гуманизированных мышей; в моделях с введением ГСК в костномозговой канал большой берцовой кости подсчитывали количество клеток в костном мозге из большой берцовой кости гуманизированных мышей.

ющая внутривенное введение ГСК пуповинной крови с последующим приживлением клеток в течение девяти недель, показывает, что у мышей формируется самоподдерживающийся пул стволовых гемопоэтических клеток, поскольку стволовые CD34⁺ клетки продолжают регистрироваться в костном мозге в количестве, существенно превышающем введенное число ГСК, спустя девять недель после введения. Также в костном мозге регистрировался пул созревающих лейкоцитарных CD45⁺ клеток. При этом часть CD45⁺ клеток заселяли селезёнку и в небольшом количестве регистрировались в периферической крови.

При введении ГСК периферической крови стволовые клетки человека неспособны к длительной репопуляции в костном мозге животных, однако ранее было показано, что возможно использовать ГСК периферической крови для краткосрочных экспериментов [15]. В настоящей работе сравнивали эффективность трансплантации ГСК, полученных из периферической и из пуповинной крови, при их введении в костномозговой канал большой берцовой кости и наблюдении в течение 14 сут после одновременного облучения и трансплантации. Из табл. 1 видно, что ГСК пуповинной крови обладают способностью к увеличению своей популяции в костном мозге и одновременно к дифференцировке в зрелые CD45⁺ клетки, в отличие от ГСК периферической крови, количество которых в костном мозге мышей не изменяется в течение 14 сут. В обоих краткосрочных моделях отмечена сопоставимая способность клеток человека заселять селезёнку и поддерживать пул зрелых клеток, циркулирующих в периферической крови.

Первая модель является классической схемой получения гуманизированных животных после облучения в сублетальной дозе путём внутривенной трансплантации ГСК человека [18]. Однако эта модель не подходит для целей персонализации индивидуальных реакций ГСК на облучение, так как требуется оценка чувствительности клеток взрослых людей. Применение ГСК, полученных из мобилизованной с помощью ГКСФ периферической крови, оказывается менее эффективным, чем ГСК пуповинной крови [19], кроме того, мобилизация ГСК в периферическую кровь явля-

ется довольно болезненной процедурой. Более удобным было бы использование ГСК из немобилизованной периферической крови у взрослых людей, которое возможно в относительно короткий промежуток времени после введения. Сравнивали показатели ГСК после острого γ -облучения в трёх описанных моделях для решения вопроса о возможности использования ГСК периферической крови в краткосрочных экспериментах для оценки их выживаемости и восстановления после облучения.

Выживаемость ГСК человека. Во всех моделях выживаемость ГСК на 3-и сут после облучения описывалась экспоненциальной моделью (для модели ГСК пуповинной крови $R^2=0,67$; $F=38,65$; $p<0,001$; для ГСК периферической крови $R^2=0,93$; $F=211$; $p<0,001$; для ГСК пуповинной крови в коротком тесте $R^2=0,55$; $F=14,90$; $p=0,002$). На 14-е сут после облучения количество клеток по отношению к необлучённому контролю описывалось линейной функцией, имело обратную зависимость от дозы (для модели ГСК пуповинной крови модель статистически незначима; для ГСК периферической крови $R^2=0,65$; $F=12,90$; $p=0,009$; для ГСК пуповинной крови в коротком тесте $R^2=0,44$; $F=5,5$; $p=0,05$) (рис. 1). При этом после облучения в дозе 0,5 Гр у некоторых доноров отмечено повышение количества ГСК по сравнению с их исходным количеством без облучения (относительное количество клеток больше единицы), в то время как у других доноров число клеток оставалось сниженным.

Были рассчитаны значения D_0 для ГСК на основе результатов регрессионного анализа выживаемости клеток через 3 сут после облучения. В модели длительного приживления ГСК пуповинной крови D_0 составила 1,19 Гр (95% ДИ от 0,90 до 1,74 Гр), в модели с ГСК периферической крови D_0 составила 0,99 Гр (95% ДИ от 0,87 до 1,15 Гр), в краткосрочной модели ГСК пуповинной крови D_0 имела наименьшее значение и составила 0,93 Гр (95 % ДИ от 0,61 до 1,91 Гр). Все величины D_0 оказались близки друг к другу и к литературным данным, приводящим значение D_0 для ГСК человека в пределах 1 Гр [20].

Не отличались также модели, описывающие зависимость выживаемости клеток от дозы, полученные для ГСК пуповинной крови

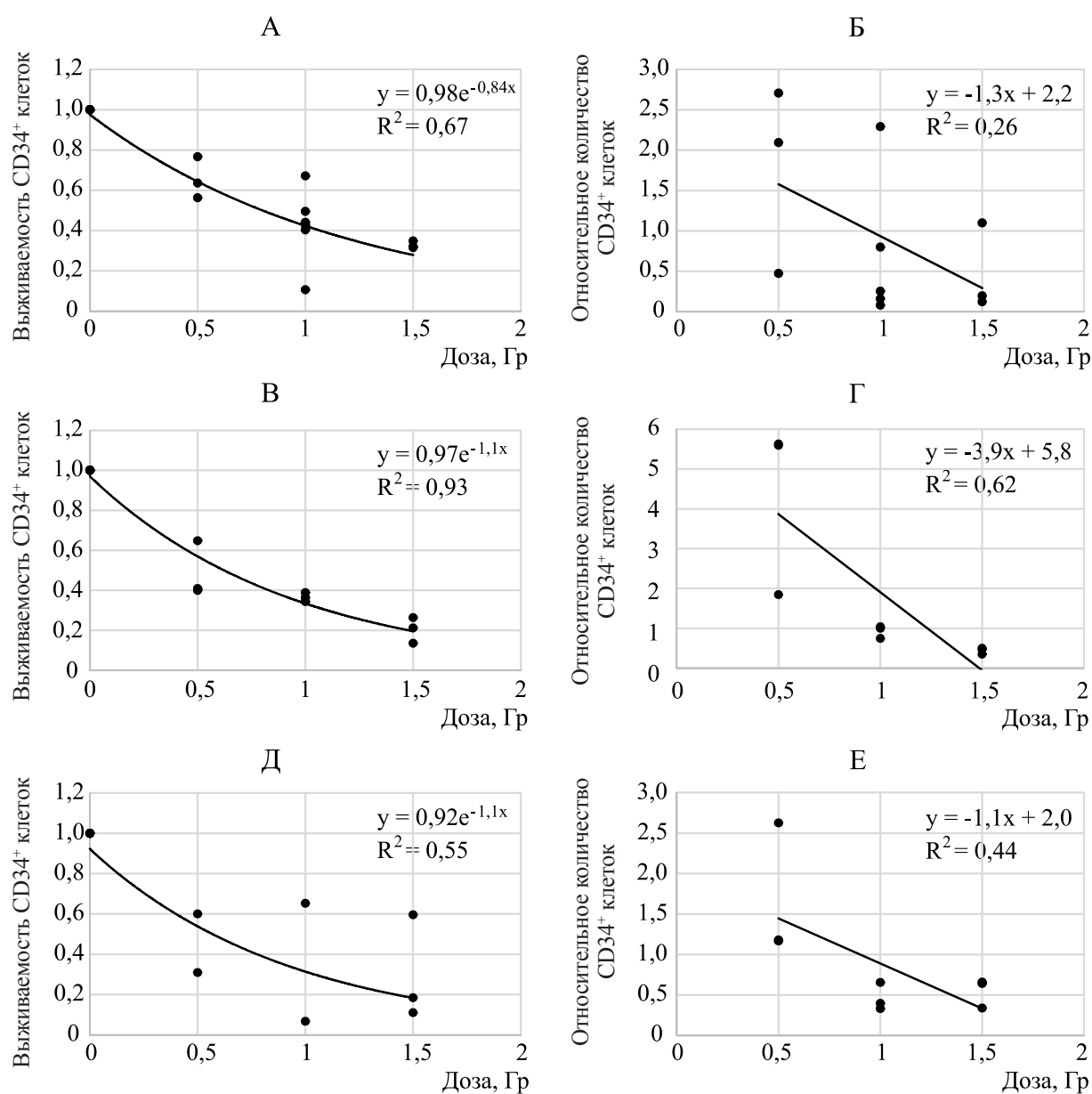


Рис. 1. Относительное количество ГСК человека после облучения по отношению к необлучённому контролю в трёх моделях гуманизированных животных. А, Б – в модели с длительным приживлением ГСК пуповинной крови на 3-и и 14-е сут после облучения соответственно; В, Г – в краткосрочной модели введения ГСК периферической крови на 3-и и 14-е сут после облучения соответственно; Д, Е – в краткосрочной модели введения ГСК пуповинной крови на 3-и и 14-е сут после облучения соответственно

в длительном тесте и периферической крови: нет статистически значимых отличий при сравнении коэффициентов ($t=1,18$; $p=0,24$) и свободного члена ($t=0,15$; $p=0,88$) в уравнениях зависимости выживаемости ГСК от дозы на 3-и сут после облучения; при сравнении угла наклона ($t=0,19$; $p=0,85$) и свободного члена ($t=0,34$; $p=0,74$) в уравнениях зависимости относительного числа клеток от дозы на 14-е сут после облучения.

С увеличением дозы снижалось и количество созревающих $CD45^+$ клеток (относительно контрольного уровня без облучения у того же донора). На третьи сутки после облучения количество $CD45^+$ клеток всегда было меньше, чем их количество без облучения, а через 14 сут после облучения уровень $CD45^+$ клеток увеличивался и мог превышать фоновый или оставаться меньше фонового значения (рис. 2).

Изменение в зависимости от дозы относительного количества созревающих $CD45^+$ клеток человека в костном мозге гуманизированных мышей по отношению к необлучённому контролю во всех трёх моделях описывалось линейной зависимостью. Статистически значимые зависимости от дозы были получены только для снижения относительного числа $CD45^+$ клеток через 3 сут после облучения (для модели ГСК пуповинной крови $R^2=0,71$; $F=45,94$; $p<0,001$; для ГСК периферической крови $R^2=0,92$; $F=192$; $p<0,001$; для ГСК пуповинной крови в коротком тесте $R^2=0,49$; $F=11,66$; $p=0,005$), в то время как на 14-е сут после облучения наблюдалась большая индивидуальная вариабельность этого показателя.

Полученные результаты позволяют заключить, что радиационно-индуцированная гибель стволовых $CD45^{low}CD34^+$ и созревающих и зрелых $CD45^+$ клеток определяется в большей степени дозой, нежели индивидуальными отличиями клеток от разных доноров (получены модели зависимости показателей от дозы с высокими уровнями значимости). При этом последующее восстановление ГСК и $CD45^+$ клеток зависит от дозы в меньшей степени и существенно определяется индивидуальной вариабельностью.

Изменение доли ГСК после облучения. При облучении изменяется не только абсолютное количество ГСК человека в костном мозге

облучённых животных, но и их относительное содержание, доля ГСК среди всех $CD45^{low/+}$ клеток. После облучения относительный процент ГСК снижается, что, вероятно, объясняется более высокой радиочувствительностью этих клеток. Ранее была проведена работа, показавшая связь коэффициента $K_{14/3}$ с выживаемостью животных и репопуляцией клеток в костном мозге у негуманизированных мышей *in vivo* [21]. Во всех трёх моделях рассчитанный для изменения доли ГСК на 14-е сут по отношению к доле ГСК на 3-и сут после облучения коэффициент $K_{14/3}$ имел линейную зависимость от дозы (для модели ГСК пуповинной крови $R^2=0,57$; $F=13,26$; $p=0,005$; для ГСК периферической крови $R^2=0,45$; $F=5,67$; $p=0,048$; для ГСК пуповинной крови в коротком тесте $R^2=0,25$; $F=2,04$; $p=0,2$) (рис. 3, 4А).

В модели ГСК пуповинной крови с длительным приживлением коэффициент $K_{14/3}$ оказался ниже, чем в моделях короткого эксперимента, что может быть связано с отличиями в кинетике клеточных популяций сразу после трансплантации и спустя девять недель, необходимых для установления равновесного состояния пула ГСК в костном мозге гуманизированной мыши. Однако нет статистически значимых отличий в моделях зависимости коэффициента $K_{14/3}$ от дозы для ГСК периферической и пуповинной крови в краткосрочном тесте при внутрикостном введении, при сравнении коэффициента угла наклона прямой $t=0,72$; $p=0,48$, при сравнении свободного члена $t=0,56$; $p=0,58$. Коэффициенты, полученные в этих моделях, были объединены в одну модель (рис. 4Б), описывающую линейное снижение $K_{14/3}$ с увеличением дозы ($R^2=0,35$; $F=8,07$; $p=0,01$). На рис. 4Б также видно, что в каждой дозовой группе были доноры, характеризующиеся более высокими коэффициентами $K_{14/3}$, а наибольшие индивидуальные отличия коэффициента отмечаются при облучении в дозе 0,5 Гр.

Снижение $K_{14/3}$ с дозой указывает на то, что коэффициент может быть использован для описания биологической реакции кроветворной ткани на облучение и что более низкие значения показателя ассоциированы с более выраженным влиянием ионизирующего излучения. Аналогичное направление изменения

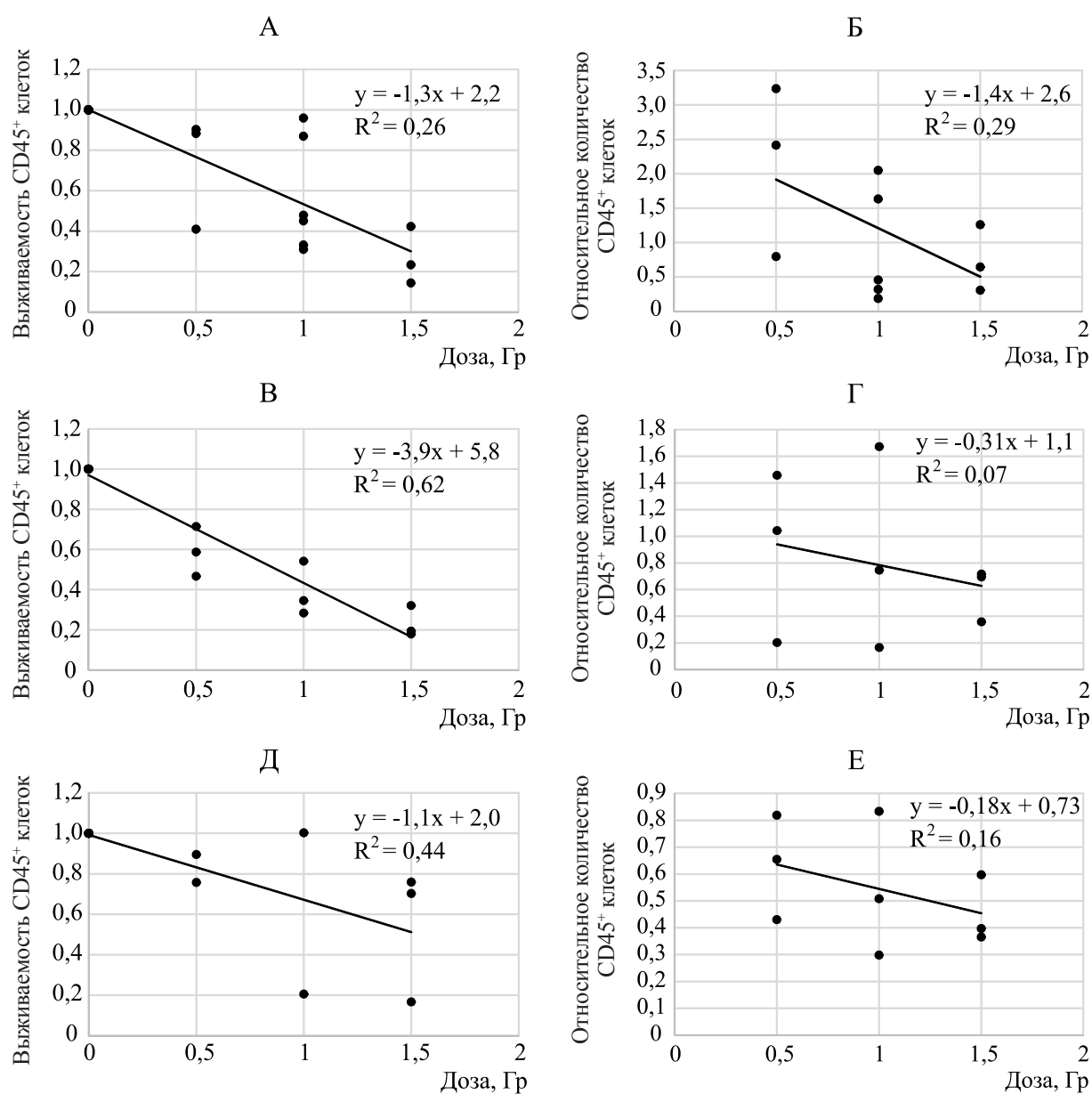


Рис. 2. Относительное количество CD45⁺ клеток человека после облучения по отношению к необлучённому контролю в трёх моделях гуманизированных животных.

А, Б – в модели с длительным приживлением ГСК пуповинной крови на 3-и и 14-е сут после облучения соответственно; В, Г – в краткосрочной модели введения ГСК периферической крови на 3-и и 14-е сут после облучения соответственно; Д, Е – в краткосрочной модели введения ГСК пуповинной крови на 3-и и 14-е сут после облучения соответственно

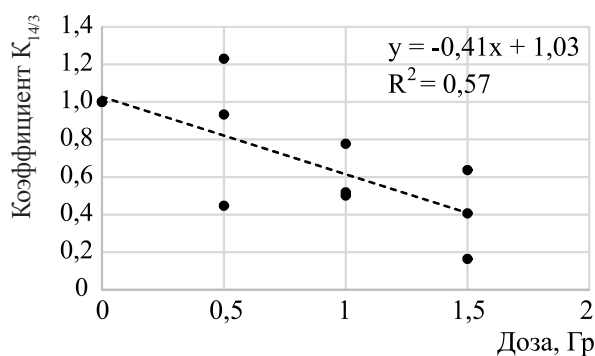


Рис. 3. Коэффициент $K_{14/3}$ в модели ГСК пуповинной крови с длительным приживлением

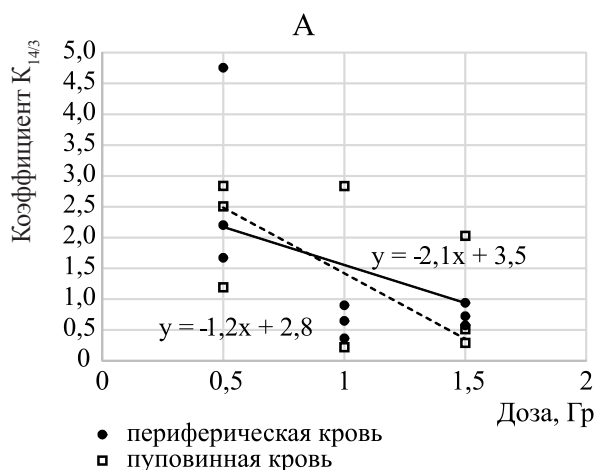


Рис. 4. Коэффициент для краткосрочных моделей периферической и пуповинной крови. А – модели ГСК периферической и пуповинной крови; Б – объединённые данные

Таблица 2

Изменение коэффициента $K_{14/3}$ при использовании радиопротекторного средства цистеамин в модели ГСК пуповинной крови с длительным приживлением клеток

Измерение	$K_{14/3}$ без цистеамина	$K_{14/3}$ с цистеамином
Донор 1, доза 0,5 Гр	0,45	1,2* $t=6,0$; $p<0,001$
Донор 2, доза 0,5 Гр	1,2	1,7* $t=2,0$; $p=0,04$
Донор 3, доза 1,0 Гр	0,50	1,2* $t=5,3$; $p<0,001$

Примечание. * – статистически значимые отличия от показателя без применения цистеамина.

$K_{14/3}$ отмечено при сравнении этого показателя в модели ГСК пуповинной крови у животных, гуманизированных ГСК от одних и тех же доноров, получивших и не получивших цистеамин перед облучением. У животных, защищённых радиопротектором, $K_{14/3}$ был статистически значимо выше (табл. 2).

Показатель $K_{14/3}$ рассматривается авторами как интегральный показатель, отражающий изменение относительной доли ГСК среди других кроветворных клеток, а следовательно, связанный с выживаемостью ГСК и их репопуляцией, а также с количеством созревающих $CD45^+$ клеток. Ассоциация более высокого значения $K_{14/3}$ с меньшими уровнями дозы и с более высокой радиорезистентностью может быть связана с более эффективной репопуляцией ГСК после облучения, более высоким пролиферативным потенциалом и более эффективным восстановлением пула стволовых клеток до того, как будут запущены процессы дифференцировки, созревания $CD45^+$ клеток [22].

Ни в одной модели не было отмечено статистически значимой зависимости от дозы для относительной интенсивности флуоресценции $\gamma H2AX$ через 3 и 14 сут после облучения по отношению к фоновому уровню, свойственному для того же донора клеток без облучения (рис. 5). Этот показатель имел широкую индивидуальную вариабельность: при облучении в любой из трёх использованных доз были доноры, у которых к третьим суткам после

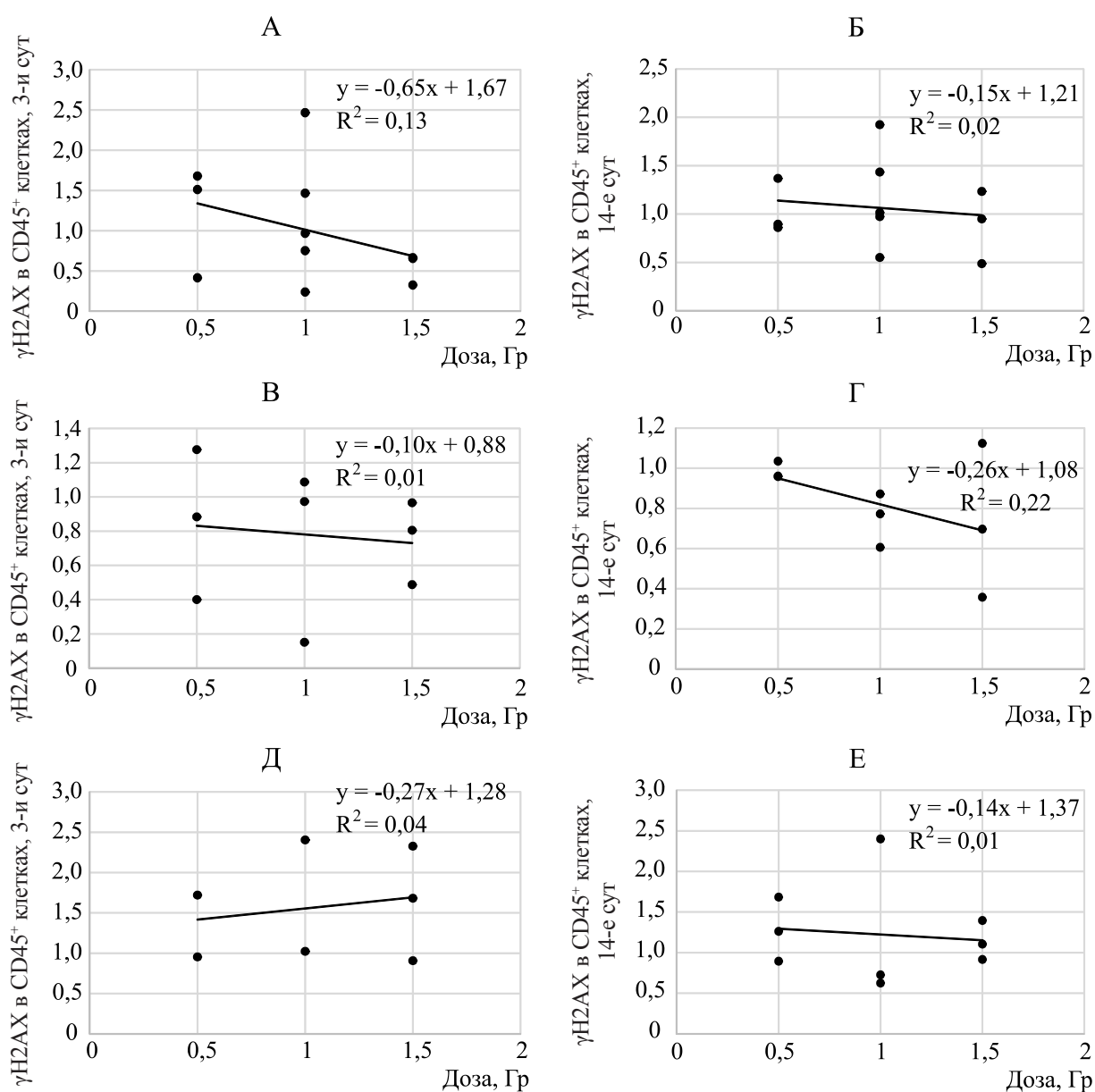


Рис. 5. Относительная интенсивность флуоресценции γH2AX в CD45^+ клетках человека после облучения по отношению к необлучённому контролю в трёх моделях гуманизированных животных.

А, Б – в модели с длительным приживлением ГСК пуповинной крови на 3-и и 14-е сутки после облучения соответственно; В, Г – в краткосрочной модели введения ГСК периферической крови на 3-и и 14-е сутки после облучения соответственно; Д, Е – в краткосрочной модели введения ГСК пуповинной крови на 3-и и 14-е сутки после облучения соответственно

облучения флуоресценция γ H2AX возвращалась к исходному уровню (значение относительной интенсивности флуоресценции близко к единице), доноры, у которых уровень γ H2AX оставался повышенным относительно исходного (относительная интенсивность флуоресценции больше единицы), и доноры, у которых уровень γ H2AX снижался относительно исходного (относительная интенсивность флуоресценции меньше единицы). На 14-е сут после облучения также оставались доноры, у которых интенсивность флуоресценции была выше или ниже исходного уровня.

Таким образом, на основании сходства зависимостей от дозы для выживаемости ГСК человека и коэффициента $K_{14/3}$, отражающего изменение доли ГСК на 14-е сут после облучения по отношению к доле ГСК на 3-и сут, можно заключить, что модель с внутрикостным введением ГСК немобилизованной периферической крови мышам с тяжёлым комбинированным иммунодефицитом может быть использована для оценки реакции ГСК на острое внешнее γ -облучение. В модели регистрируются индивидуальные отличия, касающиеся в основном разной способности восстанавливать пул ГСК и количество созревающих $CD45^+$ клеток через 14 сут после облучения. Предложенный для анализа в данной модели коэффициент $K_{14/3}$ также подвержен индивидуальным вариациям и ассоциирован с радиочувствительностью. При этом на данном этапе разработки модели оценки персонифицированных реакций ГСК с помощью гуманизированных мышей возможно проводить сравнение радиочувствительности нескольких лиц и определение более резистентных и/или чувствительных: более высокие значения коэффициента ассоциированы с более высокой устойчивостью. При накоплении результатов измерения выживаемости ГСК и коэффициента $K_{14/3}$ у большой группы лиц возможно определение референтных значений используемых показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана экспериментальная модель для оценки персонифицированной реакции ГСК человека на ионизирующее излучение. Показана возможность использования ГСК

периферической крови взрослых людей для трансплантации иммунодефицитным мышам и моделирования индивидуальных персонифицированных реакций ГСК на острое внешнее γ -облучение на основе оценки их выживаемости, репопуляции и восстановления их клоногенной активности. В качестве интегрального показателя, отражающего эти процессы, предложен коэффициент $K_{14/3}$, который выражает отношение доли ГСК ($CD45^{low}CD34^+$) среди всех $CD45^+$ клеток на 14-е сут после облучения к доле ГСК на 3-и сут после облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Applegate K.E., Rühm W., Wojcik A. et al. Individual response of humans to ionising radiation: governing factors and importance for radiological protection // *Radiat. Environ. Biophys.* – 2020 May. – V. 59. – No. 2. – P. 185–209.
2. Хаитов Р.М., Акеев А.В., Кофиади И.А. Индивидуальная радиочувствительность и иммунитет: национальное руководство. – Челябинск: Книга, 2018. – 216 с.
3. Human radiosensitivity / Report of the independent Advisory Group on Ionising Radiation Documents of the Health Protection Agency. – London, 2013. – 164 p.
4. Ferlazzo M.L., Bourguignon M., Foray N. Functional assays for individual radiosensitivity: A critical review // *Semin. Radiat. Oncol.* – 2017 Oct. – V. 27. – No. 4. – P. 310–315.
5. Шайхаев Е.Г. Молекулярно-генетические маркеры радиочувствительности, позволяющие прогнозировать появление радиационных повреждений у больных, проходящих лучевую терапию // *Вестник РНЦПР.* – 2018. – № 4. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/molekulyarno-geneticheskie-markery-radiochuvstvitelnosti-pozvolyayushchie-prognozirovat-poyavlenie-radiatsionnyh-povrezhdeniy-u> (дата обращения: 15.11.2022).
6. Kišonas J., Venius J., Sevriukova O. et al. Individual radiosensitivity as a risk factor for the radiation-induced acute radiodermatitis // *Life.* – 2022. – V. 12. – No. 1. – P. 20.
7. Brzozowska K., Pinkawa M., Eble M.J. et al. In vivo versus in vitro individual radiosensitivity analysed in healthy donors and in prostate cancer patients with and without severe side effects after

- radiotherapy // *Int. J. Radiat. Biol.* – 2012. – V. 88. – P. 405–413.
8. Goodarzi A.A., Jeggo P.A. Irradiation induced foci (IRIF) as a biomarker for radiosensitivity // *Mutat. Res.* – 2012 Aug. – V. 736. – No. 1–2. – P. 39–47.
9. Аклеев, А.В. Хронический лучевой синдром у жителей прибрежных сёл реки Течи. – Челябинск: Книга, 2012. – 464 с.
10. Fliedner T.M., Tibken B., Hofer E.P., Paul W. Stem cell responses after radiation exposure: a key to the evaluation and prediction of its effects // *Health Phys.* – 1996. – V. 70. – No. 6. – P. 787–797.
11. Fliedner T.M., Graessle D.H. Hematopoietic cell renewal systems: mechanisms of coping and failing after chronic exposure to ionizing radiation // *Radiat. Environ. Biophys.* – 2008. – V. 47. – P. 63–69.
12. Fujiwara S. Humanized mice: a brief overview on their diverse applications in biomedical research // *J. Cell. Physiol.* – 2018. – V. 233. – P. 2889–2901.
13. Ito R., Takahashi T., Ito M. Humanized mouse models: application to human diseases // *J. Cell. Physiol.* – 2018. – V. 233. – Is. 5. – P. 3723–3728.
14. Ilmer M, Berger M. Avatars to personalized medicine: of mice and men // *Hepatobiliary Surg Nutr.* – 2017 Oct. – V. 6. – No. 5. – P. 347–349.
15. Атаманюк Н.И., Пряхин Е.А., Андреев С.С. и др. Использование ксенотрансплантации гемопоэтических клеток человека, выделенных из периферической крови взрослых людей и пуповинной крови, иммунодефицитным мышам для изучения действия ионизирующего излучения // *Вопросы радиац. безопасности.* – 2021. – № 1. – С. 72–83.
16. Borràs M., Armengol G., De Cabo M. et al. Comparison of methods to quantify histone H2AX phosphorylation and its usefulness for prediction of radiosensitivity // *International J. of Radiation Biology.* – 2015. – V. 91. – P. 915–924.
17. Rube C.E., Fricke A., Widmann T.A., et al. Accumulation of DNA damage in hematopoietic stem and progenitor cells during human aging // *PLoS ON.* – 2011. – V. 6. – No. 3. – e17487.
18. Tanner A., Taylor S.E., Decottignies W., Berges B.K. Humanized mice as a model to study human hematopoietic stem cell transplantation // *Stem. Cells Dev.* – 2014 – V. 23. – Is. 1. – P. 76–82.
19. Bernard D., Peakman M., Hayday A.C. Establishing humanized mice using stem cells: maximizing the potential // *Clinical and Experimental Immunology.* – 2008. – No. 152. – P. 406–414.
20. Hall E.J., Giaccia A.J. Radiobiology for the radiologist. – 8th edition. – Philadelphia: Wolters Kluwer, 2019. – 1160 p.
21. Атаманюк Н.И., Стяжкина Е.В., Обвинцева Н.А. и др. Кинетика гибели и восстановления клеток костного мозга у мышей двух линий с разной радиочувствительностью после острого γ-облучения // *Вопросы радиац. безопасности.* – 2021. – № 4. – С. 62–72.
22. Отчёт МКРЗ по тканевым реакциям, ранним и отдалённым эффектам в нормальных тканях и органах – пороговые дозы для тканевых реакций в контексте радиационной защиты. Публикация 118 МКРЗ // *Труды МКРЗ.* – Челябинск: Книга, 2012. – 384 с.

УДК 616-006

© 2023

ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ НЕМЕЛАНОМНЫМ РАКОМ КОЖИ У РАБОТНИКОВ, ПОДВЕРГШИХСЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ ХРОНИЧЕСКОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

М.В. Банникова, В.Л. Рыбкина, Т.В. Азизова, Е.С. Григорьева
Россия, г. Озёрск, ФГБУН "Южно-Уральский институт биофизики"
ФМБА России

Цель настоящего исследования – оценка показателей заболеваемости немеланомным раком кожи (НМРК) у работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению. Заболеваемость НМРК изучена в когорте работников, впервые нанятых на предприятие атомной промышленности в 1948–1982 гг. (22377 чел.; женщины – 25,4 %). Рассчитаны "грубые" и стандартизованные по возрасту показатели заболеваемости НМРК на 1000 работников. Изучены показатели заболеваемости НМРК в зависимости от пола, достигнутого возраста, календарного периода установления диагноза, суммарной поглощённой в коже дозы внешнего γ -излучения, оценён темп прироста заболеваемости. В изучаемой когорте работников за весь период наблюдения было зарегистрировано 346 случаев НМРК. Показатели заболеваемости НМРК увеличивались с увеличением достигнутого возраста работников. Стандартизованный показатель заболеваемости НМРК у мужчин составил $0,63 \pm 0,04$, у женщин – $0,50 \pm 0,05$ на 1000 работников соответственно. Выявлен статистически значимый линейный тренд роста заболеваемости НМРК у мужчин за весь период наблюдения и у женщин до 1994 г. Темп прироста заболеваемости между периодами 1948–1973 и 1974–1993 гг. был выше у мужчин, между периодами 1948–1973 и 1994–2018 гг. был выше у женщин. В период 1994–2018 гг. как у мужчин, так и у женщин абсолютный прирост заболеваемости НМРК был обусловлен как изменением возрастной структуры изучаемой когорты, так и увеличением риска заболеть. Обнаружены значимые различия показателей заболеваемости НМРК в зависимости от суммарной поглощённой в коже дозы внешнего γ -излучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: НЕМЕЛАНОМНЫЙ РАК КОЖИ, ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ, ТЕМП ПРИРОСТА, ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ХРОНИЧЕСКОЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Злокачественные новообразования (ЗНО) кожи включают меланому кожи (код МКБ-10: C43) и другие ЗНО кожи (код МКБ-10: C44) [1]. Немеланомный рак кожи (НМРК) – совокупное название группы ЗНО кожи, включающей в себя базальноклеточный рак (базалиома), плоскоклеточный рак и рак придатков кожи (сальных и потовых желез, волосяных фолликулов).

НМРК являются самыми распространенными ЗНО, занимая высокое ранговое место в структуре онкологической заболеваемости в большинстве стран мира, достигая 50 % в США и Австралии. Наиболее низкие показатели заболеваемости НМРК наблюдаются среди населения Восточной и Юго-восточной Азии [2–5].

НМРК является мультифакторным заболеванием. Основными факторами являются пол, возраст, генетические и фенотипические особенности, факторы окружающей среды, включая ионизирующее излучение [6–10].

Сравнительный анализ показателей кумулятивного риска развития раков у населения РФ (0–74 года) показывает, что среди всех локализаций риск развития НМРК в 2004–2014 гг. был одним из самых высоких (4-е ранговое место) и имел тенденцию к росту. В РФ с 2004 по 2014 гг. наблюдался статистически значимый тренд роста заболеваемости НМРК при среднегодовых темпах прироста стандартизованных показателей $0,86\%$ у мужчин и $1,82\%$ у женщин [11].

Цель настоящего исследования – оценка показателей заболеваемости НМРК у работников, подвергшихся профессиональному хроническому облучению.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Производственное объединение (ПО) "Маяк", первое предприятие атомной промышленности в РФ, расположенное в Уральском федеральном округе, начало свою деятельность в 1948 г. Исследование заболеваемости НМРК проведено в когорте работников, впервые нанятых на ПО "Маяк" в 1948–1982 гг., независимо от пола, возраста, национальной принадлежности, образования, профессии и т.д. (22377 чел., из них 25,4 % – женщины). Преобладающее большинство работников (более 80 %) были наняты на предприятие в возрасте моложе 30 лет; средняя продолжительность работы на предприятии составила $18,35 \pm 0,11$ лет у мужчин и $17,36 \pm 0,17$ лет у женщин. Период наблюдения за когортой начинался от даты найма на ПО "Маяк" и продолжался до даты первого из следующих событий: даты установления диагноза НМРК; даты смерти; 31.12.2018 для тех, кто, как известно, был жив; даты выезда из города (мигранты); даты "последней медицинской информации" для лиц с неизвестным жизненным статусом. Жизненный статус на конец периода наблюдения был известен для 95 % членов когорты; из них 67,3 % умерли и 32,7 % живы. Средний возраст на момент смерти у мужчин составил $62,30 \pm 0,13$ года; у женщин – $72,06 \pm 0,22$ года; а средний возраст тех, кто был жив на конец периода наблюдения, – $67,54 \pm 0,13$ лет и $75,80 \pm 0,19$ лет соответственно.

Источниками первичных данных являлись архивные и текущие медицинские карты, истории болезней. Информация для настоящего исследования была получена из медико-дозиметрической базы данных "Клиника", структура и характеристика которой подробно представлена ранее [12]. Все болезни и причины смерти закодированы в соответствии с Международной статистической классификацией болезней 10-го пересмотра (МКБ-10) [1].

Работники изучаемой когорты в процессе трудовой деятельности подвергались профес-

сиональному хроническому облучению. Для оценки доз внешнего γ -облучения была использована версия "Дозиметрической системы работников ПО "Маяк", 2013" (ДСРМ-2013) [13]. Средняя суммарная поглощённая в коже доза внешнего γ -излучения за весь период работы у мужчин составила – $0,53 \pm 0,01$ Гр, и у женщин – $0,42 \pm 0,01$ Гр.

Из исследования исключены два человека, у одного из которых был случай базальноклеточного рака (БКР) до найма на ПО "Маяк" и один случай у работника, подвергшегося острому облучению.

Статистический анализ данных проведён с использованием стандартного пакета Statistica 6.0. Рассчитаны нестандартизованные ("грубые") и стандартизованные по возрасту показатели заболеваемости на 1000 работников с использованием методов медицинской статистики [14, 15] и рекомендаций [16].

В таблицах представлены показатели заболеваемости с указанием стандартной ошибки. Для оценки статистической значимости различий средних величин использовали t-критерий Стьюдента; уровень статистической значимости оценивали при $p < 0,05$.

Все участники исследования или их законные представители подписали "Информированное согласие на участие в исследовании" и "Согласие на обработку персональных данных". Исследование одобрено наблюдательным советом по защите прав человека в научно-исследовательских программах ЮУрИБФ ФМБА России.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На конец периода наблюдения в изучаемой когорте работников у 341 чел. с НМРК (63,5 % у мужчин и 36,5 % у женщин) было зарегистрировано 346 гистологически подтверждённых типов НМРК: 289 случаев только БКР, 44 – только плоскоклеточный рак (ПКР), 4 – БКР и ПКР, 5 случаев – рак придатков кожи.

Преобладающее большинство случаев НМРК зарегистрировано у лиц в возрасте старше 60 лет (у мужчин – 64,7 %, у женщин – 81,7 %). Средний возраст на момент установления диагноза НМРК у мужчин составил $64,35 \pm 0,78$ года, у женщин $70,58 \pm 0,95$ лет.

Хорошо известно, что возраст является одним из основных факторов риска развития ЗНО кожи. Показано, что НМРК чаще всего развивается в возрасте 50–69 лет, однако в последние годы появилась тенденция к его "омоложению" [5, 11, 17, 18].

Преобладающее большинство случаев НМРК у работников изучаемой когорты зарегистрировано в период 1994–2018 гг. (67,0 % у мужчин и 78,3 % у женщин), что обусловлено прежде всего постарением когорты в этот период. Тенденция к росту заболеваемости ЗНО кожи в РФ обусловлена постарением населения и улучшением диагностики в связи с внедрением новых инструментальных методов обследования [11].

Показатели заболеваемости НМРК увеличивались с увеличением достигнутого возраста работников, что хорошо согласуется с результатами других исследований, в которых было показано, что возраст старше 50 лет является фактором риска развития ЗНО кожи [5, 11, 17, 18]. Наиболее высокие показатели заболеваемости НМРК были выявлены в группе работников старше 70 лет как у мужчин, так и у женщин (табл. 1).

Анализ динамики "грубых" показателей заболеваемости НМРК в изучаемой когорте работников за весь период наблюдения (с 1948 по 2018 гг.) показал статистически значимый рост заболеваемости от 0,05 до 4,10 на 1000 человеко-лет к концу периода наблюдения, обусловленный прежде всего увеличением достигнутого возраста работников (рис. 1).

Стандартизованный показатель заболеваемости НМРК в изучаемой когорте работников у мужчин составил $0,64 \pm 0,04$, у женщин – $0,50 \pm 0,05$ на 1000 человеко-лет соответственно (табл. 2). Выявлено статистически значимое различие заболеваемости НМРК в зависимости от пола в исследуемой когорте работников. Заболеваемость НМРК в исследуемой когорте была статистически значимо выше, чем в РФ и Уральском федеральном округе в 2018 г.

Стандартизованные показатели заболеваемости НМРК в изучаемой когорте работников также существенно увеличивались к 2018 г. (рис. 2).

Выявлен статистически значимый линейный тренд роста заболеваемости НМРК у

мужчин за весь период наблюдения ($R^2=0,87$) и у женщин до 1994 г. ($R^2=0,75$).

Преобладающее большинство случаев НМРК у работников исследуемой когорты зарегистрировано в период 1994–2018 гг. (67,0 % у мужчин и 78,3 % у женщин). Сравнительный анализ показателей заболеваемости НМРК в изучаемой когорте работников в отдельные календарные периоды (1948–1973, 1974–1993 и 1994–2018) показал, что заболеваемость НМРК статистически значимо увеличилась в период 1974–1993 гг. у мужчин и в период 1994–2018 гг. у обоих полов по сравнению с периодом 1948–1973 гг. Показатели заболеваемости НМРК были выше у мужчин по сравнению с женщинами во всех трёх периодах: 1948–1974, 1974–1993 и 1994–2018 гг., но только в период 1974–1993 гг. эти различия были статистически значимы (табл. 3). Темп прироста заболеваемости между 1948–1973 и 1974–1993 гг. был выше у мужчин, между 1948–1973 и 1994–2018 гг. был выше у женщин.

Абсолютный прирост заболеваемости НМРК в периоды 1974–1993 и 1994–2018 гг. был выше у мужчин, чем у женщин при сравнении с периодом 1948–1973 гг. (табл. 3). В период 1994–2018 гг. у мужчин и у женщин абсолютный прирост заболеваемости НМРК был обусловлен как изменением возрастной структуры изучаемой когорты, так и увеличением риска заболеть.

Полученные результаты согласуются с данными национальной статистики. Анализ динамики показателей заболеваемости ЗНО кожи за 2008–2018 гг. в РФ показал прирост грубых показателей заболеваемости НМРК на 30,62 %, а рост заболеваемости ЗНО в целом за тот же период составил 23,72 % [17].

Проведён анализ стандартизованных показателей заболеваемости НМРК в зависимости от пола работников и суммарной поглощённой в коже дозы внешнего γ -излучения (табл. 4). Показатели заболеваемости НМРК были статистически значимо выше у мужчин, подвергшихся внешнему γ -облучению в суммарной поглощённой в коже дозе 0,2–0,5, 0,5–1,0 и выше 1,0 Гр, по сравнению с теми, кто подвергся облучению в дозе менее 0,1 Гр. Показатели заболеваемости НМРК у женщин, подвергшихся внешнему γ -облучению в суммарной погло-

Таблица 1

"Грубые" показатели заболеваемости НМРК в изучаемой когорте
в зависимости от пола и возраста работников (на 1000 человеко-лет)

Достигнутый возраст, лет	Мужчины		Женщины	
	Число случаев	Показатели заболеваемости	Число случаев	Показатели заболеваемости
< 50	28	0,10±0,02	7	0,08±0,03
50–59	50	0,68±0,96 ^b	15	0,44±0,11 ^b
60–69	67	1,48±0,18 ^b	25	0,91±0,18 ^{a, b}
70+	76	3,35±0,38 ^b	73	3,11±0,36 ^b
Грубый	221	0,54±0,04	120	0,68±0,06 ^a
Стандартизованный	221	0,64±0,04	120	0,50±0,05 ^a

Примечание: ^a – статистически значимые различия ($p < 0,05$), сравнение по полу; ^b – статистически значимые различия ($p < 0,05$) с предыдущим возрастом.

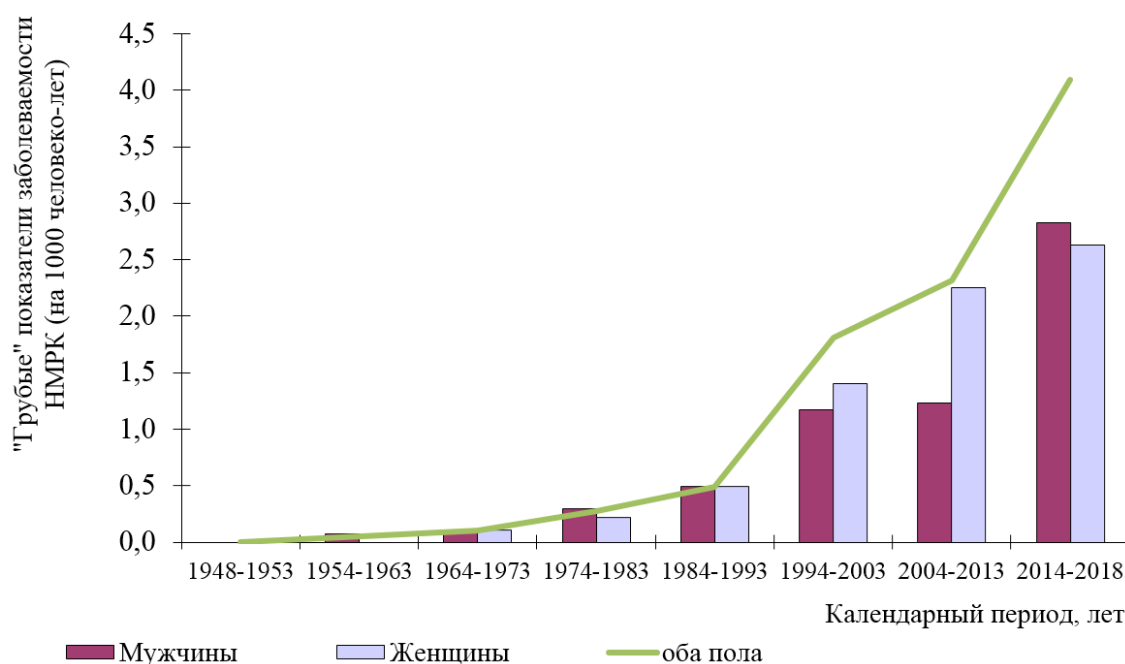


Рис. 1. Динамика "грубых" показателей заболеваемости НМРК
в изучаемой когорте за весь период наблюдения

щённой в коже дозе 0,5–1,0 Гр, были выше по сравнению с теми, кто подвергся облучению в дозе менее 0,1 Гр ($p > 0,5$).

Таким образом, результаты анализа динамики показателей заболеваемости НМРК в когорте работников, подвергшихся про-

фессиональному хроническому облучению, в период 1948–2018 гг. показали статистически значимый рост заболеваемости НМРК, обусловленный изменением возрастной структуры изучаемой когорты и риском заболеть, связанным с увеличением продолжительно-

Таблица 2

Стандартизованные показатели заболеваемости НМРК
в зависимости от пола (на 100 тыс.)

Когорта	Мужчины		Женщины	
	Число случаев	Показатели заболеваемости	Число случаев	Показатели заболеваемости
Изучаемая когорта	221	63,8±3,93 ^{b, c}	120	49,8±5,33 ^{a, b, c}
РФ	29149	28,26±0,17	49550	27,43±0,14
УФО	2106	26,84±0,60	3710	26,67±0,48

Примечание: РФ – Российская Федерация; УФО – Уральский федеральный округ (по РФ, УФО приведены данные за 2018 г. [17]); ^a – статистически значимые различия ($p < 0,05$), сравнение по полу; ^b – статистически значимые различия ($p < 0,05$) с данными РФ; ^c – статистически значимые различия ($p < 0,05$) с данными УФО.

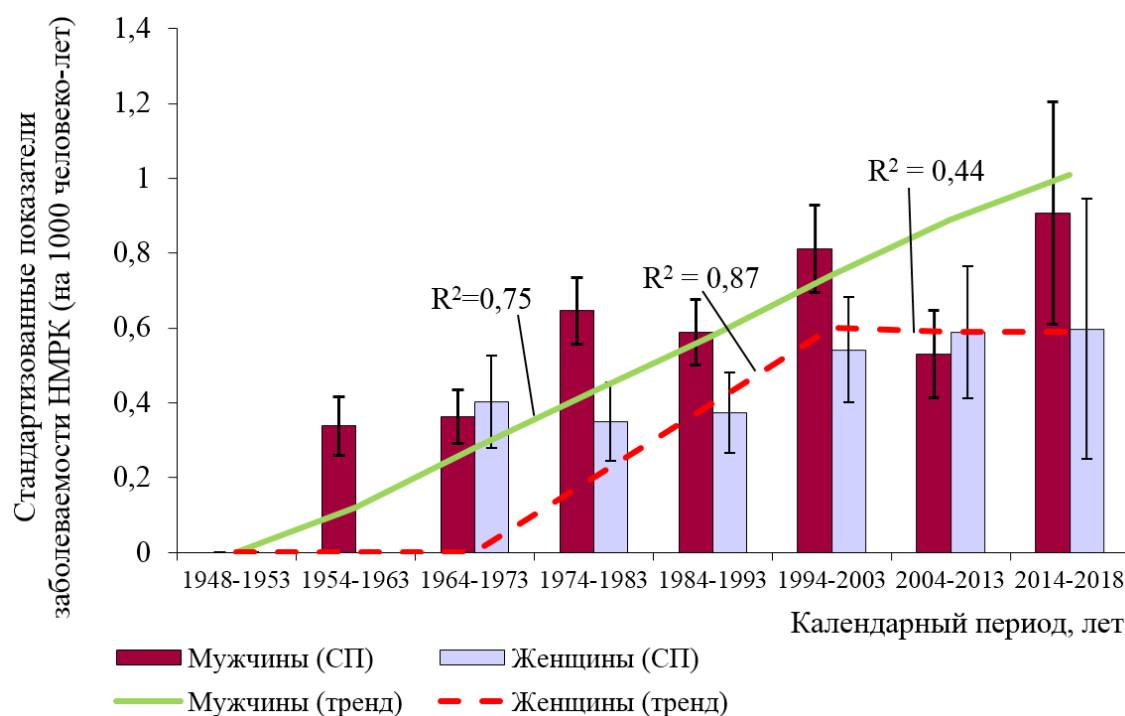


Рис. 2. Динамика стандартизованных показателей заболеваемости НМРК в изучаемой когорте работников за весь период наблюдения

сти жизни. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами других исследований как в нашей стране, так и за рубежом [5, 11, 17–20]. Достоверные сведения об изменениях в динамике заболеваемости ЗНО в целом и ЗНО отдельных локализаций, в том

числе НМРК, важны для планирования в системе здравоохранения. В связи с этим эпидемиологические исследования заболеваемости НМРК в различных регионах РФ, учитывающие не только географическое положение региона, природные и климатические усло-

Таблица 3
Компонентный анализ динамики заболеваемости НМРК (на 1000 человеко-лет)

Период наблюдения	Число случаев	ЗНК	Стандартизованный показатель заболеваемости БКРК	Абс. прирост	Темп прироста, %	Компоненты прироста		
						Возрастная структура	Риск заболеть	Возрастная структура и риск заболеть
Мужчины								
1948–1973	11	143884,2	0,33±0,05	–	–	–	–	–
1974–1993	62	158552,6	0,61±0,06 *	0,28	85,89	7,91	11,29	12,57
1994–2018	148	109693,2	0,70±0,08 *	0,37	114,45	9,61	13,77	104,81
Женщины								
1948–1973	3	59199,99	0,23±0,06	–	–	–	–	–
1974–1993	23	64845,1	0,37±0,08 ^a	0,14	62,43	-1,02	18,87	14,09
1994–2018	94	51180,7	0,57±0,11 *	0,34	152,45	-3,01	30,45	152,73

Примечание: * – статистически значимые различия с периодом 1948–1973 гг.; ^a – статистически значимые различия по полу.

Таблица 4
Показатели заболеваемости НМРК в зависимости от пола и дозы внешнего γ-облучения,
поглощённой в коже (на 1000 человеко-лет)

Доза внешнего γ-облучения на кожу, Гр	Мужчины		Женщины		Оба пола	
	Число случаев	Показатели заболеваемости	Число случаев	Показатели заболеваемости	Число случаев	Показатели заболеваемости
< 0,1	34	0,40±0,05	44	0,33±0,06	78	0,36±0,04
0,1–0,2	27	0,59±0,10	14	0,40±0,13	41	0,51±0,08
0,2–0,5	50	0,65±0,09 ^a	17	0,40±0,12	67	0,56±0,07 ^a
0,5–1,0	36	0,64±0,11 ^a	22	0,77±0,20 ^a	58	0,68±0,10 ^a
≥ 1,0	71	0,88±0,11 ^a	21	0,58±0,15	92	0,79±0,09 ^a

Примечание. ^a – статистически значимые различия (p<0,05) с дозой <0,1 Гр.

вия, экологию, но и специфические производственные факторы риска (например, ионизирующее излучение), а также оценивающие отдельные компоненты прироста заболеваемости ЗНО кожи, являются очень важными для оптимизации медицинского обеспечения и повышения качества медицинской помощи. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости усиления первичной и вторичной профилактики развития рака кожи и, в первую очередь, повышения качества регулярных профилактических осмотров, особенно контингентов, работающих во вредных условиях труда (источники ионизирующего излучения, химические и канцерогенные факторы и др.).

Когорта работников ПО "Маяк" является уникальной когортой для исследования раков кожи. Главными преимуществами изучаемой когорты являются большая численность, длительный период наблюдения (более 70 лет), известный жизненный статус для 95 % членов когорты, полные и качественные данные о перенесённых заболеваниях за весь период наблюдения, полученные на основе ежегодных обязательных медицинских обследований, индивидуальные измеренные дозы облучения и наличие информации о нерадиационных факторах риска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показатели заболеваемости НМРК в когорте работников предприятия атомной промышленности Уральского федерального округа, подвергшихся профессиональному хроническому облучению, зависели от пола, достигнутого возраста работников и календарного периода установления диагноза и суммарной поглощённой в коже дозы внешнего γ -излучения. Стандартизованные показатели заболеваемости в исследуемой когорте были статистически значимо выше, чем в РФ и УФО. Выявлен статистически значимый рост заболеваемости НМРК в период 1994–2018 гг. В период 1994–2018 гг. у мужчин и у женщин абсолютный прирост заболеваемости НМРК был обусловлен как изменением возрастной структуры изучаемой когорты, так и увеличением риска заболеть.

ЛИТЕРАТУРА

1. Международная статистическая классификация болезней и проблем, связанных со здоровьем. Десятый пересмотр: в 3 т. – Т. 1. – М.: Медицина, 1995.
2. World Health Organization. International Agency for Research on Cancer. Cancer Today. – URL: <https://gco.iarc.fr/today/home> (дата обращения: 14.10.2022).
3. Leiter U., Eigentler T., Garbe C. Epidemiology of skin cancer // *Advances In Experimental Medicine and Biology*. – 2014. – No. 810. – P. 120–140.
4. Raasch B.A., Buettner P.G., Garbe C. Basal cell carcinoma: histological classification and body-site distribution // *British Journal of Dermatology*. – 2006. – V. 155. – No. 2. – P. 401–407.
5. Rogers H.W., Weinstock M.A., Feldman S.R., Coldiron B.M. Incidence Estimate of Nonmelanoma Skin Cancer (Keratinocyte Carcinomas) In the US Population, 2012 // *JAMA Dermatology*. – 2015. – V. 151. – No. 10. – P. 1081–1086.
6. Рыбкина В.Л. Факторы риска развития злокачественных новообразований кожи. Эпидемиология // *Клинич. дерматология и венерология*. – 2019. – Т. 18. — № 5. – С. 548–555.
7. Erdmann F., Lortet-Tieulent J., Schuz J. et al. International trends in the incidence of malignant melanoma, 1953–2008: are recent generations at higher or lower risk? // *Int. J. Cancer*. – 2013. – V. 132. – No. 2. – P. 385–400.
8. Ferlay J., Shin H.R., Bray F. et al. GLOBOCAN, 2008. – V. 1.2. – Cancer incidence and mortality worldwide: IARC CancerBase. – No. 10. – Lyon, France: IARC, 2010.
9. Karagas M.R., McDonald J.A., Greenberg E.R. et al. Risk of basal cell and squamous cell skin cancers after ionizing radiation therapy. For the skin cancer prevention study group // *J. Natl. Cancer Inst.* – 1996. – V. 88. – No. 24 – P. 1848–1853.
10. United Nations Scientific Committee On the Effects of Atomic Radiation. Effects of ionizing radiation. UNSCEAR, 2006. Report to the General Assembly with annexes. Annex A. Epidemiological studies of radiation and cancer. – United Nations: New York, 2008. – 322 p.
11. Дерматоонкология (злокачественные новообразования кожи, первичные лимфомы кожи). Атлас / Под ред. Н.В. Кунгурова. – Екатеринбург: Макс-Инфо, 2016. – 168 с.

12. 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.
13. Napier B.A. The Mayak worker dosimetry system (MWDS–2013): an introduction to the documentation // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2017. – V. 176. – No. 1–2. – P. 6–9.
14. Гланц С. Медико-биологическая статистика. – М.: Практика, 1998. – 459 с.
15. Мерков А.М., Поляков Л.Е. Санитарная статистика (пособие для врачей). – М.: Медицина, 1975. – 245 с.
16. Организация онкологической службы в России (методические рекомендации, пособия для врачей). Ч. 2 / Под ред. Чиссова В.И., Старинского В.В., Ковалева Б.Н. – М.: ФГУ МНИОИ Росмедтехнологий им. П.А. Герцена, 2007. – 663 с.
17. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахзадова А.О. Злокачественные новообразования в России (заболеваемость и смертность). – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ "НМИРЦ радиологии" Минздрава России, 2019. – 250 с.
18. Siegel R., Ma J., Zou Z., Jemal A. Cancer statistics, 2014 // *CA Cancer J. Clin.* – 2014. – V. 64. – No. 1. – P. 9–29.
19. Шляхтунов Е.А. Рак кожи: современное состояние проблемы // *Вестник ВГМУ*. – 2014. – Т. 13. – № 3. – С. 20–28.
20. Уфимцева М.А., Липатов Г.Я., Шубина А.С. и др. Эпидемиологические аспекты заболеваемости злокачественными новообразованиями кожи в Свердловской области // *Экология человека*. – 2020. – № 3. – С. 4–9.

УДК 616.036.22

© 2023

СТРУКТУРА СМЕРТНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ Г. ОЗЁРСКА ЗА ПЕРИОД 1948–2013 гг.

Ю.В. Царева, П.В. Окаренко
Россия, г. Озёрск, ФГБУН "Южно-Уральский институт биофизики"
ФМБА России

Смертность трудоспособного населения является наиболее актуальной проблемой, указывающей на необходимость оценки демографических и социально-экономических потерь. В данной работе анализируется структура смертности населения г. Озёрска, построенного более 70 лет назад рядом с предприятием атомного комплекса ПО "Маяк", за период 1948–2013 гг.

Доля смертности от всех злокачественных новообразований среди жителей города была несколько выше, чем аналогичный показатель России. Наибольший удельный вес занимали болезни органов кровообращения, новообразования, травмы и отравления. Также следует отметить, что среди жителей города Озёрска показатель смертности от болезней системы кровообращения был выше, чем аналогичный показатель в Российской Федерации, и он не имел тенденции к снижению на протяжении всего периода наблюдения.

Это лишь первый этап работы по анализу смертности среди всего населения г. Озёрска. В дальнейшем будут проанализированы показатели смертности с учётом различных источников информации о смерти. Кроме того, планируется более детально изучить показатели смертности среди групп населения, подвергавшихся профессиональному радиационному воздействию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СТРУКТУРА СМЕРТНОСТИ, НАСЕЛЕНИЕ, г. ОЗЕРСК, РЕГИСТР ПРИЧИН СМЕРТИ

Смертность трудоспособного населения является наиболее актуальной проблемой, указывающей на необходимость оценки демографических и социально-экономических потерь. В последние годы смертность населения всего мира в целом, и в Российской Федерации в частности, возросла. За период 1990–2019 гг. общая смертность российского населения увеличилась на 9,5 % [1].

Для снижения потерь необходимо выявить причины смертности населения. Ряд исследователей указывает на взаимосвязь демографических угроз с проблемой здоровья [2, 3]. Одной из причин повышения смертности, уменьшения продолжительности жизни, а также увеличения инвалидизации населения является рост заболеваемости по основным классам болезней.

Город Озёрск – это первый в России закрытый город, возникший более 70 лет назад в связи со строительством и пуском в эксплу-

атацию ядерного комплекса ПО "Маяк". Ранее сотрудниками Южно-Уральского института биофизики (ФГБУН ЮУрИБФ) был проведён анализ интенсивных и экстенсивных показателей смертности населения г. Озёрска за 1948–1997 гг. [4]. Было показано, что динамика стандартизованных по возрасту показателей смертности от всех причин, болезней системы кровообращения, органов дыхания, пищеварения, а также младенческая смертность во многом повторяли аналогичные показатели для городского населения Российской Федерации (РФ), но на более низком уровне. Вместе с тем, уровень смертности населения города от злокачественных новообразований был близок или превышал российский показатель. Представленную в этой работе информацию следовало рассматривать как начальный этап в изучении многоаспектной проблемы смертности населения в уникальной популяции г. Озёрска.

Мы продолжаем изучение показателей смертности населения г. Озёрска за более расширенный период наблюдения с 1948 по 2013 гг. включительно. В данной работе мы анализируем структуру смертности среди всего населения г. Озёрска.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Информация о дате и причине смерти для населения города была в основном получена из свидетельств о смерти, зарегистрированных в городском отделе ЗАГС. Основанием для регистрации смерти служили врачебные свидетельства. В г. Озёрске имеется один ЗАГС, где сосредоточены все записи о случаях смерти с момента образования города до настоящего времени. Информация о причинах смерти была закодирована по Международной классификации болезней девятого пересмотра (МКБ-9) [4].

На основании этих данных в Южно-Уральском институте биофизики была создана база данных "Смертность" [5]. Эта база данных включает в себя следующую информацию: фамилию, имя, отчество и пол умерших, дату рождения и дату смерти, код причины смерти по МКБ-9, источник регистрации причины смерти, год въезда в город, профессию до въезда в город, место работы в городе, образование. База данных "Смертность" содержит информацию на 37219 умерших в г. Озёрске за период с 1948 по 2013 гг. включительно, в том числе на 19760 мужчин (53,1 %) и на 17459 женщин (46,9 %). На основе этой базы данных в ФГБУН ЮУрИБФ был проведён ряд исследований, касающихся показателей смертности населения г. Озёрска, а также показателей смертности среди детского населения и работников ПО "Маяк".

Для более качественного анализа причин смерти было решено провести модификацию базы данных "Смертность" с использованием данных из различных источников информации о смерти. Была создана новая база данных "Регистр причин смерти населения ЗАТО г. Озёрска" [6], где были собраны все случаи смерти среди населения г. Озёрска, верифицированы медицинские данные из различных источников (данные актов отдела ЗАГС, протоколы патологоанатомической и судебно-медицинской служб, данные медицинских книжек

и т.д.). В новую базу данных была включена информация об идентификационных номерах баз данных "Регистр населения ЗАТО Озёрск, подвергавшегося в детском возрасте техногенному воздействию за счёт деятельности первого атомного предприятия России ПО "Маяк" ("Детский регистр г. Озёрска") [7] и "Медикодозиметрический регистр персонала ФГУП "Производственное объединение "Маяк" ("Регистр персонала ПО "Маяк") [8], фамилия, имя, отчество и дата рождения умерших, дата и место смерти, причина смерти, закодированная по правилам Международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем, девятого и десятого пересмотра (МКБ-9 и МКБ-10), номер документа. Информация о причине смерти учитывала каждый источник информации: врачебное свидетельство, протоколы патологоанатомической и судебно-медицинских служб, сведения из медицинских книг и других медицинских документов.

Так как в последние годы в научном мире всё чаще эпидемиологические исследования основываются на кодировании по правилам МКБ-10 [9], то причину смерти в новой базе данных кодировали по требованиям МКБ-9 и МКБ-10 одновременно. При этом зашифрована была не только основная причина смерти, но и все пункты, внесённые в медицинское свидетельство о смерти или в протокол патологоанатомической и судебно-медицинской служб, т.е. непосредственная причина смерти, патологические состояния, которые привели к возникновению вышеуказанной причины, основная причина смерти, а также прочие важные состояния, способствующие смерти, но не связанные с ней непосредственно.

Данная информация о причине смерти позволит более качественно проанализировать показатели смертности среди всего населения г. Озёрска, а также среди детского населения и работников ПО "Маяк" с учётом различных медицинских источников информации. Эта информация в дальнейшем также позволит оценить качество прижизненной диагностики болезней в городе посредством сопоставления данных клинических диагнозов с данными аутопсии.

Результаты эпидемиологического анали-

за подвергнуты обработке с использованием общепризнанных в медицинской статистике методов [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего за исследуемый период с 1948 по 2013 гг. в городе умерло 37219 человек, из них 19760 мужчин (53,1 %) и 17459 женщин (46,9 %). В таблице представлено распределение умерших жителей города с учётом наиболее значимых причин смерти.

Первое место в структуре смертности среди жителей г. Озёрска занимали болезни системы кровообращения (код МКБ-9 390-459) среди всего населения (46,6 % от всех причин смерти). Последующие места в убывающем порядке принадлежали злокачественным новообразованиям (19,9 %), травмам и отравлениям (13,3 %), болезням органов пищеварения (4,3 %), болезням органов дыхания (3,8 %), инфекционным и паразитарным болезням (2,6 %), психическим расстройствам (2,3 %). На перечисленные классы болезней приходилось 92,8 % от всех случаев смерти.

Структура смертности среди мужчин и женщин практически не отличалась. Следует отметить лишь факт, что женщины чаще умирали от болезней кровообращения (54,7 %), чем

мужчины (39,5 %). А среди мужчин достоверно преобладали внешние причины смерти – 19,3 % против 6,6 % среди женщин, а также существенную роль у мужчин играли психические заболевания (3,3 % у мужчин, 1,1 % у женщин).

В первые годы существования г. Озёрска среди мужчин существенное значение имели такие заболевания как травмы и отравления (27,5 % в 1948–1959 гг., 30,1 % в 1960–1969 гг.), инфекционные и паразитарные болезни (22,3 % в 1948–1959 гг.), а также болезни органов кровообращения (15,1 % в 1948–1959 гг.) (рис. 1). Среди женщин в период 1948–1959 гг. наряду с инфекционными и паразитарными болезнями (23,6 %) имели значение болезни органов кровообращения (20,9 %) и злокачественные новообразования (14,8 %) (рис. 2).

С 1960 г. у женщин и с 1970 г. у мужчин болезни системы кровообращения вышли на первое место и составляли более 30 % среди всех причин смерти до конца периода наблюдения. При этом женщины от болезней системы кровообращения умирали чаще, чем мужчины.

Злокачественные новообразования с 1960 г. как среди мужчин, так и среди женщин занимали второе место и составляли около 20 % от всех причин смерти. Третье место занимали у лиц обоего пола внешние причины смерти, при этом у мужчин этот показатель составлял

Таблица

Распределение умерших по основным причинам смерти

Причины смерти	Мужчины		Женщины		Оба пола	
	Абс.	%	Абс.	%	Абс.	%
Болезни системы кровообращения (код 390-459)	7804	39,5	9553	54,7	17357	46,6
Злокачественные новообразования (код 140-208)	3923	19,9	3473	19,9	7396	19,9
Травмы и отравления (код 800-999)	3818	19,3*	1148	6,6	4966	13,3
Болезни органов пищеварения (код 520-579)	855	4,3	758	4,3	1613	4,3
Болезни органов дыхания (код 460-519)	836	4,2	586	3,4	1422	3,8
Инфекционные и паразитарные болезни (код 001-139)	558	2,8	419	2,4	977	2,6
Психические расстройства (код 290-319)	651	3,3	195	1,1	846	2,3
Отдельные состояния, возникающие в перинатальном периоде (код 760-779)	331	1,7	233	1,3	564	1,5
Симптомы, признаки и неточно обозначенные состояния (код 780-799)	314	1,6	161	0,9	475	1,3
Прочие	670	3,4	933	5,3	1603	6,3

Примечание. * обозначены достоверные различия, $p < 0,05$.

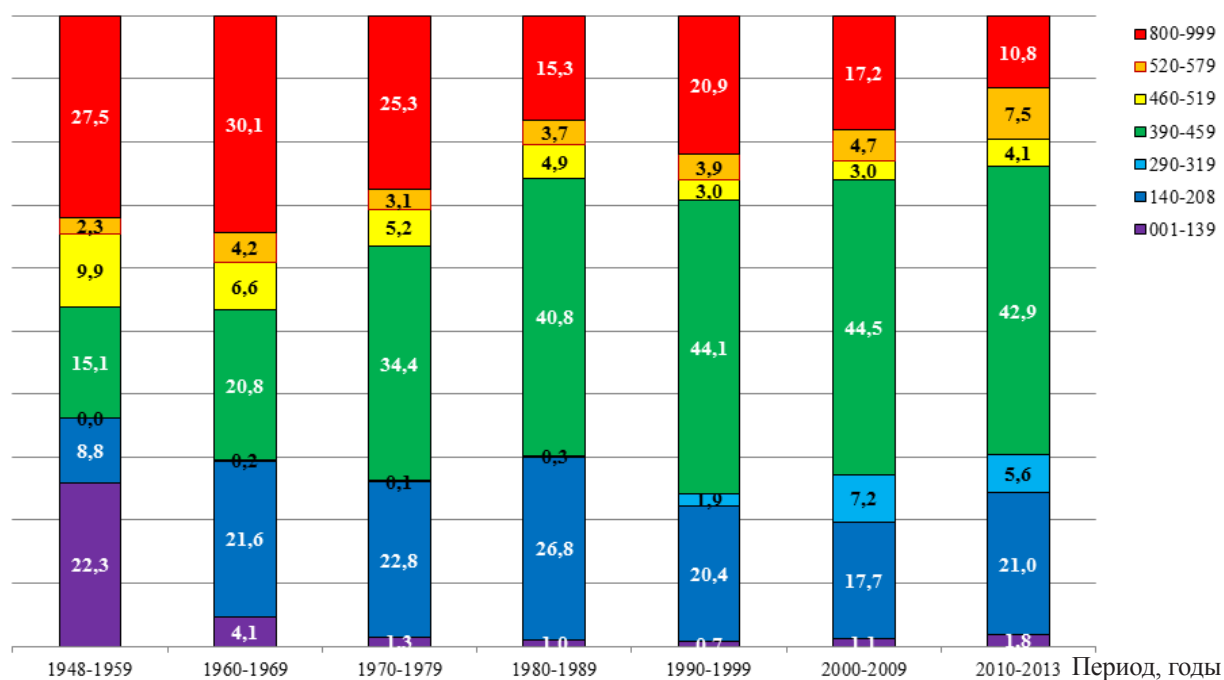


Рис. 1. Распределение умерших мужчин по периодам наблюдения

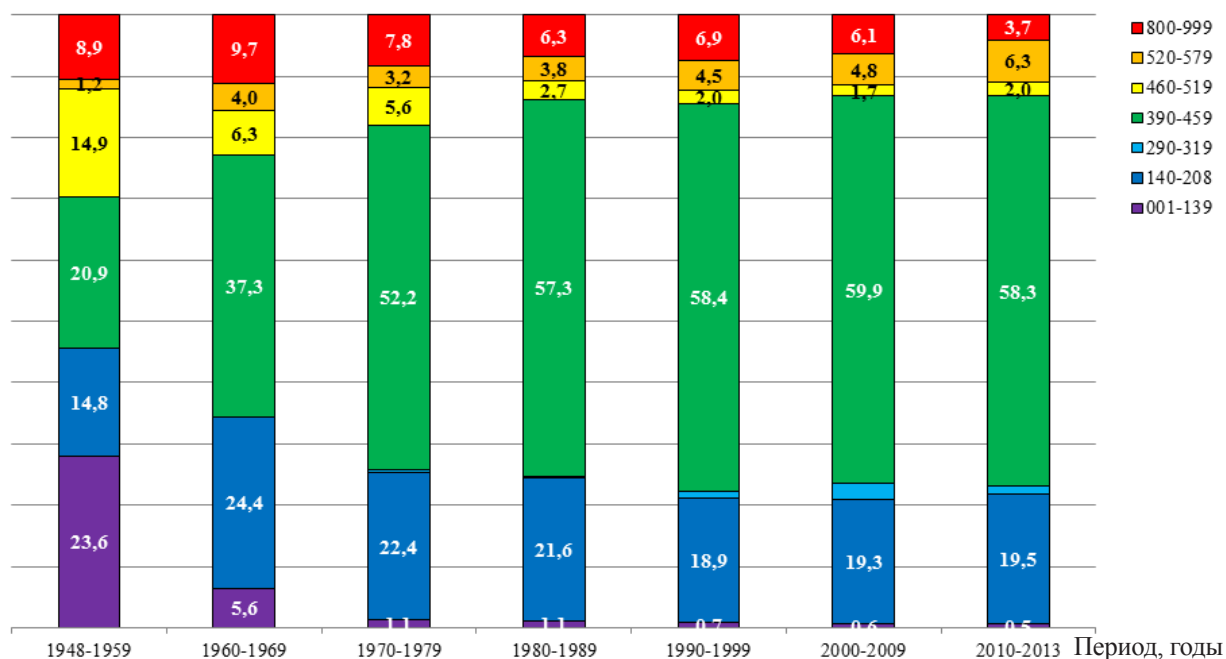


Рис. 1. Распределение умерших женщин по периодам наблюдения

около 30 % в период 1948–1969 гг. и снижался на протяжении всего наблюдаемого периода до 10,8 %. Среди женщин данный показатель составлял около 9 % в первые годы и снизился до 3,7 % в конце периода наблюдения.

Подобные изменения среди основных классов болезней в структуре смертности населения за период с 1948 по 2013 гг. можно связать с неблагоприятными социальными условиями жизни в первые годы существования города, ухудшением условий жизни населения в 1990-е годы, а также с постарением населения к концу изучаемого периода.

Основной причиной смерти в Российской Федерации являлись так же, как и в нашем исследовании, болезни системы кровообращения [11]. На их долю в 1960 г. приходилось 35,3 % от всех умерших, в дальнейшем этот показатель рос и достиг максимума – 57 % в 2007–2008 гг., с последующим снижением до 48,7 % в 2015 г. В то время как в нашем исследовании наименьший показатель по смерти от болезней органов кровообращения был в 1948–1959 гг. 17,4 %, максимума (51,6 %) он достигал к периоду 2000–2009 гг. и не снижался к концу периода наблюдения. Это связано с тем, что в первом десятилетии становления и развития города, население было молодое, средний возраст подавляющего большинства жителей города в

этот период не превышал 20–30 лет, а болезни органов кровообращения в основном связаны с возрастом умерших людей.

Средний возраст людей на момент смерти увеличивался в зависимости от периода наблюдения (рис. 3). Скорее всего, это связано с тем, что в первые годы становления и развития г. Озёрска население было достаточно молодым, в последующие годы увеличилась доля лиц пожилого возраста, а молодые люди уезжают в другие города России. В отдельных возрастных группах увеличение среднего возраста на момент смерти по периодам не отмечено.

Второе место в Российской Федерации с 2011 г. занимают новообразования, на их долю в 2015 г. приходилось 15,7 %, в то время как в нашем исследовании злокачественные новообразования занимают второе место в структуре смертности с 1960 г. (более 20 %). В г. Озёрске большая часть трудоспособного населения занята на предприятиях ПО "Маяк". В общей численности трудоспособного населения доля персонала ПО "Маяк" достигала 10–12 %. В связи с этим в дальнейшей работе будет необходимо оценить влияние радиационного фактора на показатели смертности населения г. Озёрска.

Внешние причины смерти в РФ с 2006 г. по настоящее время занимают третье место в структуре смертности от всех причин, как и

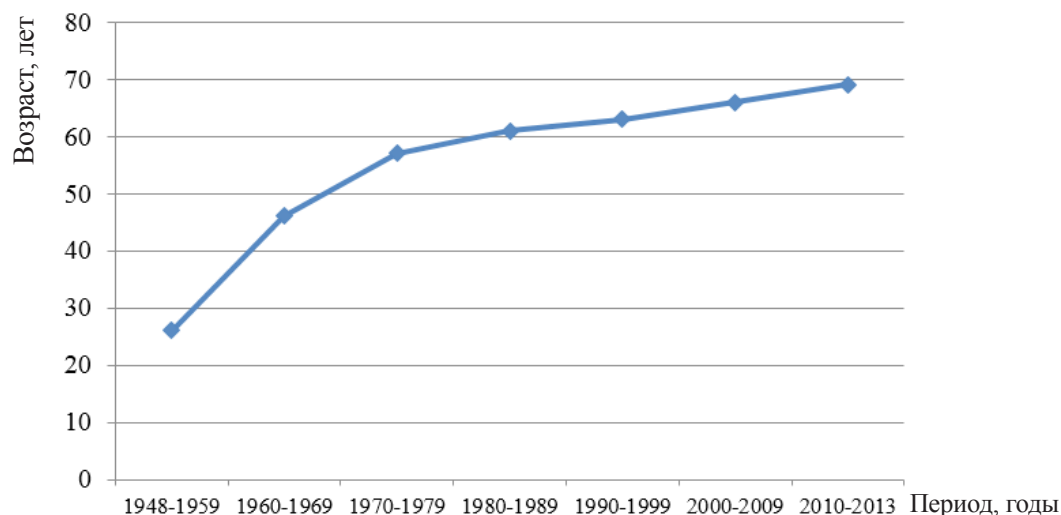


Рис. 3. Средний возраст населения г. Озёрска на момент смерти

в нашем исследовании. Травмы и отравления как причины смерти относятся к числу важных социально-экономических и медицинских проблем во всем мире. В этой проблеме проявляется влияние общественных условий жизни на здоровье населения. Поэтому в дальнейшей работе предполагается выделить из этого класса заболеваний социально значимые причины смерти, такие как самоубийства и убийства. Следует отметить, что средний возраст умерших от травм и отравлений в нашем исследовании за весь период наблюдения составлял у мужчин 39 лет, а среди женщин – 48 лет.

В течение ряда десятилетий в России увеличивается доля смертей от неопределённых причин. В структуре смертности в 1990 г. на неточно обозначенные состояния приходилось 2 %, в 2010 г. доля этих причин составила 5 % и с 2012 г. имела тенденцию к росту до 2015 г. (7,8 %). В нашем исследовании количество неточно обозначенных состояний составляло 3,3 % в первое десятилетие, в период 1960–1989 гг. данный показатель снизился до 0,1 %, а после 1990 г. доля смертей от неопределённых причин снова начала расти и составляла 1,3 %. В последний период 2010–2013 гг. намечилось увеличение доли неизвестных причин смерти до 3,3 %.

Возможно, более низкий показатель неопределённых причин смерти среди населения города по сравнению с аналогичным показателем в РФ в начале периода наблюдения объясняется тем, что удельный вклад патологоанатомических исследований умерших людей в городе довольно высок (в 1950–1970 гг. – 78–92 %, в 1990 г. – 44 %, в 1997 г. – 35,7 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доля смертности от всех злокачественных новообразований среди жителей города была несколько выше, чем аналогичный показатель России. Наибольший удельный вес занимали болезни органов кровообращения, новообразования, травмы и отравления. Также следует отметить, что среди жителей города Озёрска показатель смертности от болезней системы кровообращения был выше, чем аналогичный показатель в Российской Федерации, и он не имел тенденции к снижению на протяжении

всего периода наблюдения.

Это лишь первый этап работы по анализу смертности среди всего населения г. Озёрска. Новая база данных "Регистр причин смерти населения ЗАТО г. Озёрска" позволит проанализировать показатели смертности с учётом различных источников информации о смерти. Кроме того, в дальнейшей работе планируется более детально изучить показатели смертности среди групп населения, подвергавшихся профессиональному радиационному воздействию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попова Л.А., Тараненко Н.Н. Смертность населения России по причинам на пороге новых вызовов // Россия: тенденции и перспективы развития. – 2021. – № 16-1. – С. 735–742.
2. Короленко А.В. Проблема свехсмертности трудоспособных мужчин в Вологодской области: оценка демографических и социально-экономических потерь // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2015. – № 5-1. – С. 142–146.
3. Бровчак С.В., Виганд М.В. Влияние состояния здоровья населения на демографию в Российской Федерации // Региональная экономика: теория и практика. – 2005. – № 11. – С. 53–61.
4. Статистическая классификация болезней, травм и причин смерти. Девятого пересмотра. – М.: Москва, 1986. – 97 с.
5. Третьяков Ф.Д., Кошурникова Н.А., Креслов В.В. и др. Основные показатели смертности населения г. Озёрска за 50 лет // Вопросы радиац. безопасности. – 2002. – № 1. – С. 28–45.
6. Кошурникова Н.А., Окатенко П.В., Сокольников М.Э., Царева Ю.В. Регистр причин смерти населения ЗАТО г. Озёрска (краткое наименование: Регистр причин смерти). Свидетельство о регистрации базы данных 2021621969, 15.09.2021 г. Заявка № 2021621638 от 05.08.2021 г.
7. Кабирова Н.Р., Окатенко П.В., Кошурникова Н.А., Сокольников М.Э., Груздева Е.А., Царева Ю.В. Регистр населения ЗАТО Озёрск, подвергавшегося в детском возрасте техногенному воздействию за счёт деятельности первого атомного предприятия России ПО "Маяк"

(краткое наименование: Детский регистр г. Озёрска). Свидетельство о регистрации базы данных 2021621486, 08.07.2021 г. Заявка № 2021620799 от 23.04.2021 г.

8. Кошурникова Н.А., Сокольников М.Э., Окатенко П.В., Груздева Е.А., Кабирова Н.Р., Царева Ю.В. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020620210 "Медико-дозиметрический регистр персонала ФГУП "Производственное объединение "Маяк" (краткое наименование: Регистр персонала ПО "Маяк"). Дата регистрации 05.02.2020 г.

9. Международная статистическая классификация болезней и проблем, связанных со здоровьем. Десятый пересмотр. – М.: Медицина, 1995. – 633 с.

10. Мерков А.М., Поляков Л.Е. Санитарная статистика (пособие для врачей). – Л.: Медицина, 1974. – 384 с.

11. Какорина Е.П., Никитина С.Ю. Особенности структуры смертности в Российской Федерации // Проблемы социальной гигиены, здравоохранения и истории медицины. – 2019. – № 27 (5). – С. 822–826.

УДК 616.155.194.8

© 2023

ПОКАЗАТЕЛИ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ ЖЕЛЕЗОДЕФИЦИТНЫМИ АНЕМИЯМИ У ЛИЦ, ПОДВЕРГШИХСЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОМУ ХРОНИЧЕСКОМУ ОБЛУЧЕНИЮ

Е.В. Брагин, М.В. Банникова, Т.В. Азизова

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

А.В. Коробкин

*Россия, г. Челябинск, ГБУЗ Челябинская областная клиническая больница
Россия, г. Челябинск, АНО "Челябинское региональное
гематологическое общество"*

Актуальность. Железодефицитная анемия (ЖДА) является наиболее распространённым заболеванием среди болезней крови. Несмотря на это, во всех исследованиях влияния ионизирующего излучения на систему гемопоза основное внимание уделяется показателям лейкоцитов, в то время как влияние на эритроидный компонент системы кроветворения изучено недостаточно. **Цель.** Оценить показатели заболеваемости железодефицитными анемиями и отдельными их видами у лиц, подвергшихся хроническому облучению. **Материал и методы исследования.** Изучаемой когортой является когорта работников ПО "Маяк", поступивших на работу на один из основных заводов ПО "Маяк" в 1948–1982 гг. и наблюдавшихся до конца 2018 г. У работников изучаемой когорты было идентифицировано 1643 случая ЖДА. Статистический анализ выполнен с использованием стандартных методов медицинской статистики. Оценены "грубые", повозрастные и стандартизованные показатели заболеваемости как всеми ЖДА, так и ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, и ЖДА неуточнённого генеза. Показатели рассчитаны на 100000 человеко-лет наблюдения для мужчин и женщин отдельно и для всей когорты в целом. Стандартизация по возрасту выполнена косвенным методом, использован внутренний стандарт распределения по возрасту. Для оценки достоверности различий показателей использован двусторонний t-критерий Стьюдента. **Результаты.** Показатели заболеваемости ЖДА у женщин были статистически значимо выше, чем у мужчин. Показатели заболеваемости ЖДА увеличивались к концу периода наблюдения. У работников, подвергшихся внешнему γ -облучению в дозах 0,01–0,05 Гр, показатели заболеваемости ЖДА были статистически значимо выше по сравнению с работниками, подвергшимися облучению в дозе менее 0,01 Гр. Не выявлено зависимости показателей заболеваемости ЖДА от суммарной поглощённой в костном мозге дозы внутреннего α -излучения. **Вывод.** Показатели заболеваемости ЖДА зависели как от нерадиационных, так и радиационных факторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПОКАЗАТЕЛИ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ, ЖЕЛЕЗОДЕФИЦИТНАЯ АНЕМИЯ, ХРОНИЧЕСКОЕ ОБЛУЧЕНИЕ, ВНЕШНЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ, ВНУТРЕННЕЕ ОБЛУЧЕНИЕ

Интенсивное развитие ядерной энергетики и ядерных технологий, наращивание темпов освоения космического пространства и постоянная угроза ядерного терроризма делают необходимым развитие и совершенствование радиационной безопасности и радиологической

защиты. Совершенствование медико-санитарного обеспечения радиационной безопасности невозможно без изучения эффектов облучения, и в том числе хронического облучения с низкой мощностью дозы.

Показано, что система кроветворения

высоко чувствительна к ионизирующему излучению [1]. Доступно значительное количество работ, посвящённых эффектам в системе гемопоэза при остром облучении в различных группах лиц (лица, пережившие атомную бомбардировку в Японии; лица, подвергшиеся облучению в результате несчастных случаев или аварийного облучения и фракционированному облучению вследствие радиотерапии) [2–7]. В результате этих исследований определены зависимости "доза – эффект" в системе кроветворения.

В то же время исследования, посвящённые оценке гемопоэтических эффектов при хроническом облучении (в том числе болезням крови и кроветворных органов (БКиКО)) крайне ограничены [2, 8–13].

Железодефицитная анемия (ЖДА) является самым распространённым заболеванием среди БКиКО и одним из самых распространённых заболеваний в мире [14]. Несмотря на это, во всех исследованиях влияния ионизирующего излучения на систему гемопоэза основное внимание уделяется показателям лейкоцитов, в то время как влияние на эритроидный компонент системы кроветворения изучено недостаточно.

Целью настоящего исследования являлась оценка показателей заболеваемости железодефицитными анемиями и отдельными их видами в когорте работников, подвергшихся хроническому облучению.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Это ретроспективное исследование когорты работников Производственного объединения "Маяк" (ПО "Маяк") – крупнейшего в стране центра по переработке радиоактивных материалов. С 1948 г. предприятие также производит оружейный плутоний. Для его наработки на ПО "Маяк" действуют основные заводы (реакторный, радиохимический и плутониевый) и вспомогательные производства (завод водоподготовки, ремонтно-механический завод и др.). В когорту включено 22377 работников основных заводов, приступивших к трудовой деятельности в период 1948–1982 гг. Женщины составили 25,4 % изучаемой когорты. Возраст начала работы на ПО "Маяк" (среднее плюс-минус стандартная ошибка) был

24,9±0,1 года, продолжительность работы составила 17,9±0,1 лет.

В процессе трудовой деятельности все работники изучаемой когорты подвергались воздействию внешнего и/или внутреннего ионизирующего излучения. Суммарная поглощённая в костном мозге (КМ) доза внешнего γ -излучения (среднее плюс-минус стандартная ошибка) у мужчин была 0,40±0,01 Гр, у женщин составила 0,33±0,01 Гр; а суммарная поглощённая в КМ доза внутреннего α -излучения от инкорпорированного плутония (среднее плюс-минус стандартная ошибка) насчитывала 0,039±0,002 и 0,072±0,007 Гр соответственно.

Следует отметить, что медицинское сопровождение персонала ПО "Маяк" осуществлялось с первых дней эксплуатации предприятия специальными медицинскими и научными учреждениями по разработанной и утверждённой Министерством здравоохранения СССР стандартной программе. Медицинское наблюдение включало в себя обязательные медицинские осмотры при поступлении на работу и периодические медицинские обследования с участием различных врачей-специалистов и применением клинико-лабораторных и инструментальных методов обследования. Развёрнутый анализ периферической крови осуществлялся 4 раза в год в период 1948–1953 гг., 2 раза в год – в период 1954–1960 гг. и с 1961 г. – ежегодно в течение всего периода наблюдения. При наличии у работника стойких изменений в периферической крови он направлялся на консультацию к врачу-гематологу, и при необходимости проводилась стерильная пункция и/или трепанобиопсия. Благодаря такой системе наблюдения был накоплен большой объём первичных медицинских данных о системе кроветворения. Эти данные были перенесены на бумажные носители и введены в электронную медико-дозиметрическую БД "Клиника" [15, 16].

Для достижения целей настоящего исследования в изучаемой когорте работников были выявлены все случаи БКиКО (коды МКБ-9: 280–289), зарегистрированные за весь период наблюдения (2816 случаев БКиКО, в том числе 1643 случая ЖДА). Следует отметить, что наблюдение за работниками изучаемой когорты начиналось с даты найма на предприятие и продолжалось до 31 декабря 2018 г. Период наблю-

дения составил 70 лет (1948–2018 гг.). Период наблюдения был ограничен (в зависимости от того, какое из событий наступило раньше) датой диагноза для работников с установленным диагнозом ЖДА, датой смерти для умерших работников, датой "последней медицинской информации" для работников, потерянных для наблюдения.

Для более дифференцированного подхода к экспертизе и последующему анализу ЖДА было принято решение ввести дополнительные субкоды в БД "Клиника" в рубрике ЖДА по аналогии с тем, как это было сделано при переходе от МКБ-9 к МКБ-10 [17, 18]. Таким образом, в БД "Клиника" кодом 280.0 закодированы ЖДА вследствие хронической кровопотери; кодом 280.1 – ЖДА вследствие недостаточного поступления железа с пищей; кодом 280.8 – ЖДА, связанные с наличием сопутствующей соматической патологии (например, злокачественные новообразования); кодом 280.9 – ЖДА неясной этиологии. Была проведена ретроспективная экспертиза и верификация всех случаев ЖДА, внесённых в базу данных, при этом мы руководствовались диагностическими критериями ВОЗ (мужчины: $Hb < 130$ г/л, эритроциты $< 4,0 \cdot 10^9$, гематокрит < 39 %; женщины: $Hb < 120$ г/л, эритроциты $< 3,8 \cdot 10^9$, гематокрит < 36 %). Также, принимались во внимание данные о жалобах работников, данные объективного исследования и данные других лабораторных методов исследования в случае их наличия.

Статистический анализ выполнен с использованием стандартных методов медицинской статистики. Оценены нестандартизованные ("грубые"), повозрастные и стандартизованные показатели заболеваемости как всеми ЖДА, так и ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, и ЖДА неуточнённого генеза. Показатели рассчитаны на 100 тыс. человеко-лет наблюдения для мужчин и женщин отдельно и для всей когорты в целом. Для оценки точности показателей представлены их стандартные ошибки (СтОш). При расчёте стандартизованных показателей в анализе использована косвенная стандартизация с применением, в качестве стандарта, распределения по возрасту работников ПО "Маяк" (внутренний стандарт). Для оценки достоверности различий показателей заболеваемости использован дву-

сторонний t-критерий Стьюдента. Значимым считали уровень при $p < 0,050$ [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как и ожидалось, наиболее распространёнными среди всех анемий были ЖДА, связанные с сопутствующей соматической патологией (доля среди всех ЖДА составляет 52,5 %; подтверждены в 99,0 % случаев), и ЖДА неуточнённого генеза (доля среди всех ЖДА составляет 36,2 %; подтверждены в 84,0 % случаев). Также часто встречались постгеморрагические анемии (доля среди всех анемий составляет 17,4 %).

В табл. 1 представлены показатели заболеваемости как всеми ЖДА, так и отдельными её видами у работников изучаемой когорты в зависимости от пола и достигнутого возраста. Распространённость ЖДА в изучаемой когорте работников соответствует распространённости анемий в мире как у мужчин, так и у женщин [20].

"Грубые" показатели заболеваемости всеми ЖДА и ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, увеличивались с увеличением достигнутого возраста как у мужчин, так и у женщин; различия были статистически значимыми ($p < 0,05$). Следует отметить, что нестандартизованные показатели в возрастных группах до 60 лет и стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА, ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, и ЖДА неясного генеза у женщин были статистически значимо выше, чем у мужчин ($p < 0,001$), что объясняется физиологическими особенностями женского организма и хорошо согласуется с данными других исследований [21]. Также показано, что у женщин показатели заболеваемости ЖДА неясной этиологии статистически значимо повышались с увеличением достигнутого возраста, за исключением женщин в возрасте 50–59 и 60–69 лет, у которых различия с предыдущей возрастной группой были статистически незначимыми ($p = 0,184$, $p = 0,813$ соответственно). У мужчин статистически значимые различия с предыдущими возрастными группами были выявлены только в возрастных группах 40–49 лет и 70–79 лет ($p = 0,003$, $p < 0,001$ соответственно).

Таблица 1

Показатели заболеваемости ЖДА в зависимости от пола и достигнутого возраста работников

Возраст, лет	Мужчины			Женщины			p-value *
	Число случаев	Показатель ± СтОш	p-value ^a	Число случаев	Показатель ± СтОш	p-value ^a	
Все ЖДА							
Моложе 30	4	4,43±2,22	–	21	92,58±20,2	–	<0,001
30–39	14	15,58±4,16	0,018	47	154,33±22,51	0,049	<0,001
40–49	53	60,51±8,31	<0,001	125	360,55±32,25	<0,001	<0,001
50–59	132	178,87±15,57	<0,001	91	285,38±29,92	0,089	0,001
60–69	159	346,05±27,44	<0,001	80	308,96±34,54	0,605	0,408
70–79	208	1063,81±73,76	<0,001	219	1321,71±89,31	<0,001	0,027
80 и старше	76	1976,95±226,77	<0,001	128	2417,15±213,65	<0,001	0,169
Всего	646	157,24±6,19 (185,19±6,71)	–	711	424,6±15,92 (309,87±13,6)	–	<0,001 (<0,001)
ЖДА, связанные с сопутствующей соматической патологией							
Моложе 30	1	1,1±1,1	–	6	26,15±10,67	–	<0,001
30–39	8	8,81±3,11	0,019	22	71,12±15,16	0,024	<0,001
40–49	29	32,73±6,08	0,001	54	151,42±20,61	0,002	<0,001
50–59	93	124,35±12,89	<0,001	48	143,83±20,76	0,795	0,413
60–69	121	260,06±23,64	<0,001	57	209,95±27,81	0,053	0,182
70–79	143	717,57±60,01	<0,001	140	795,55±67,24	0,000	0,386
80 и старше	55	1377,16±185,7	<0,001	72	1221,55±143,96	0,003	0,504
Все	450	108,18±5,1 (129,96±5,59)	–	399	229,9±11,51 (164,01±9,72)	–	<0,001 (0,002)
ЖДА неясной этиологии							
Моложе 30	3	3,32±1,92	–	9	39,59±13,2	–	<0,001
30–39	6	6,67±2,72	0,315	20	65,25±14,59	0,209	<0,001
40–49	21	23,91±5,22	0,003	45	127,07±18,94	0,012	<0,001
50–59	29	39±7,24	0,085	31	93,23±16,74	0,184	0,001
60–69	27	57,93±11,15	0,137	27	99,22±19,09	0,813	0,046
70–79	49	241,65±34,52	<0,001	79	440,07±49,51	0,000	0,001
80 и старше	17	408,79±99,15	0,059	55	904,39±121,95	0,000	0,004
Все	152	36,76±2,98 (43,54±3,24)	–	266	153,49±9,41 (111,92±8,04)	–	<0,001 (<0,001)

Примечание: ^a – статистическая значимость различий по сравнению с предыдущим возрастом; * – статистическая значимость различий по полу; в скобках представлены стандартизованные показатели.

На рис. 1–3 представлена динамика показателей заболеваемости различными ЖДА за весь период наблюдения в зависимости от календарного периода.

Нестандартизованные показатели заболеваемости ЖДА ожидаемо повышались к концу периода наблюдения, что связано с увеличением достигнутого возраста работников

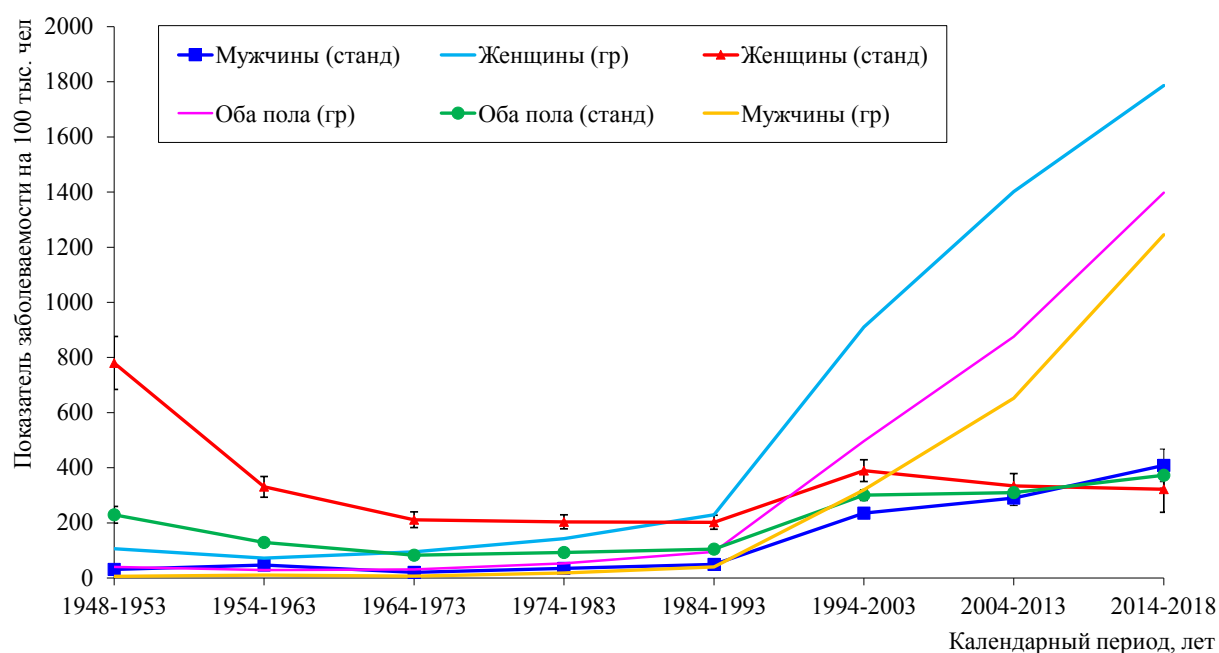


Рис. 1. Динамика показателей заболеваемости ЖДА за весь период наблюдения

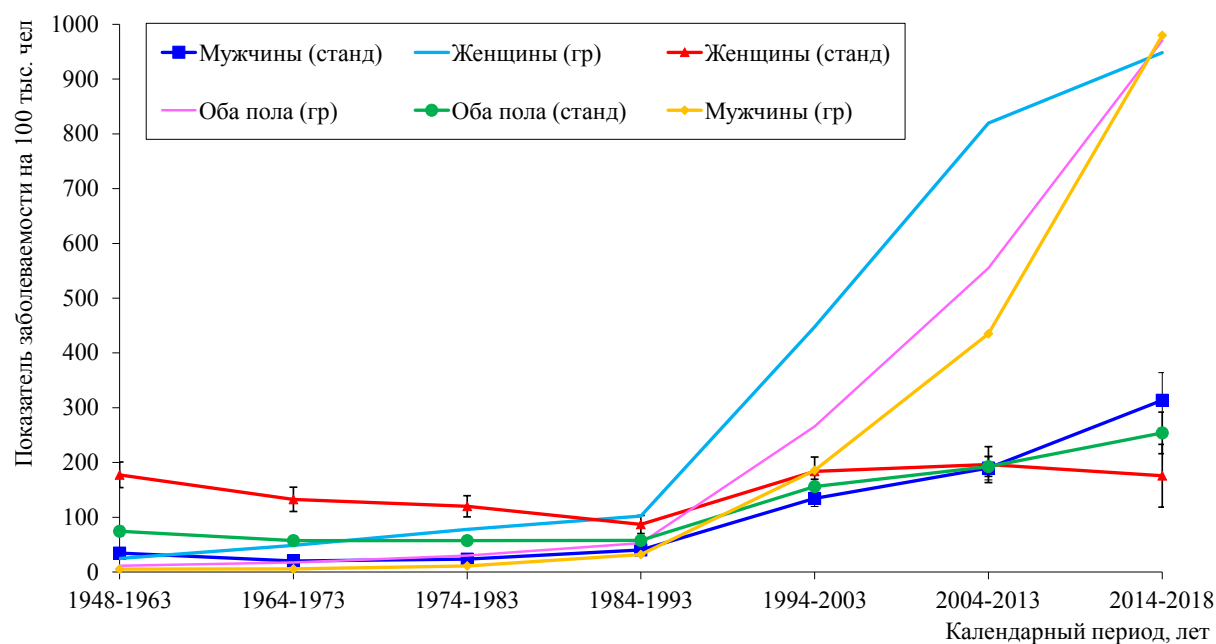


Рис. 2. Динамика показателей заболеваемости ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, за весь период наблюдения

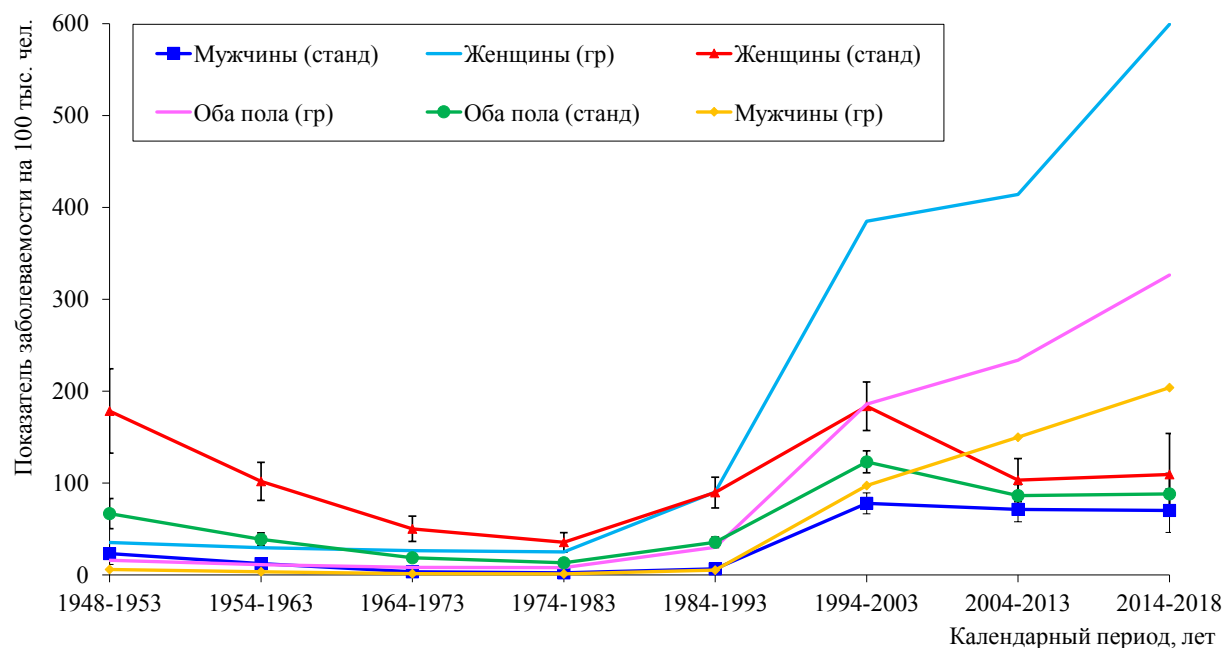


Рис. 3. Динамика показателей заболеваемости ЖДА неясного генеза за весь период наблюдения

изучаемой когорты. Стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА незначительно увеличивались к концу периода наблюдения, за исключением периода 1948–1963 гг. у женщин, что, предположительно, было обусловлено частыми беременностями работниц изучаемой когорты в этот период, т.к. анемии являются значимым фактором, осложняющим течение беременности [22]. Как видно из рис. 2, нестандартизованные показатели заболеваемости ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, повышались к концу периода наблюдения, что связано с ростом количества соматических заболеваний с увеличением возраста работников. Стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, незначительно увеличивались к концу периода наблюдения. Полученные данные совпадают с результатами наблюдения коморбидных пациентов [23]. Стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА неясного генеза у женщин оставались практически неизменными на протяжении всего периода наблюдения, в то время как у мужчин они незначительно повышались к концу периода наблюдения.

Результаты анализа заболеваемости как всеми видами ЖДА, так и отдельными её видами в зависимости от суммарной поглощённой в КМ дозы внешнего γ -излучения представлены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА у женщин, подвергшихся внешнему γ -облучению в дозе 0,1–0,5 Гр и более 0,5 Гр, были статистически значимо ниже по сравнению с женщинами, подвергшимся облучению в суммарной дозе менее 0,01 Гр ($p=0,009$, $p=0,003$ соответственно). Показатели заболеваемости ЖДА были статистически значимо выше у мужчин, подвергшихся внешнему γ -облучению в дозе 0,01–0,05 Гр, по сравнению с дозовой группой менее 0,01 Гр ($p=0,001$). Показатели заболеваемости всеми ЖДА в изучаемой когорте были статистически значимо выше у работников, подвергшихся внешнему γ -облучению в дозах 0,01–0,05 Гр, и статистически значимо ниже у работников, подвергшихся внешнему γ -облучению в дозе 0,1–0,5 Гр и более 0,1 Гр, по сравнению с работниками, подвергшимся облучению в дозе менее 0,01 Гр ($p=0,043$, $p=0,016$, $p<0,001$ соответственно).

Таблица 2

Показатели заболеваемости ЖДА в зависимости от суммарной поглощённой дозы внешнего γ -излучения

Доза облучения, Гр	Мужчины			Женщины			Оба пола		
	Число случаев	Показатель \pm СтОш	p-value *	Число случаев	Показатель \pm СтОш	p-value *	Число случаев	Показатель \pm СтОш	p-value *
Все ЖДА									
<0,01	41	163,05 \pm 20,37	–	113	355,51 \pm 37,12	–	154	270,5 \pm 20,38	–
0,01–0,05	104	266,75 \pm 19,88	0,001	152	386,9 \pm 35,12	0,541	256	327,05 \pm 18,19	0,043
0,05–0,1	80	204,41 \pm 19,71	0,152	135	421,04 \pm 43,88	0,251	215	301,97 \pm 20,13	0,275
0,1–0,5	254	202,22 \pm 12,09	0,120	168	245,68 \pm 23,39	0,009	422	217,54 \pm 10,89	0,016
>0,5	166	141,23 \pm 11,79	0,338	128	227,53 \pm 24,8	0,003	294	169,16 \pm 11,05	<0,001
ЖДА, связанные с сопутствующей соматической патологией									
<0,01	26	107,54 \pm 16,4	–	73	219,28 \pm 28,66	–	99	172,27 \pm 16,08	–
0,01–0,05	67	179,51 \pm 16,13	0,004	76	182,05 \pm 23,59	0,311	143	180,85 \pm 13,33	0,683
0,05–0,1	57	148,59 \pm 16,66	0,087	65	185,54 \pm 28,35	0,406	122	166,23 \pm 14,73	0,782
0,1–0,5	185	146,76 \pm 10,24	0,043	99	136,41 \pm 17,14	0,008	284	142,97 \pm 8,76	0,095
>0,5	115	96,99 \pm 9,75	0,568	82	138,25 \pm 19,08	0,015	197	110,75 \pm 8,89	0,001
ЖДА неясного генеза									
<0,01	11	43,03 \pm 10,44	–	38	117,15 \pm 20,99	–	49	84,48 \pm 11,31	–
0,01–0,05	33	81,12 \pm 10,93	0,020	65	161,92 \pm 22,32	0,151	98	121,25 \pm 10,99	0,006
0,05–0,1	18	45,42 \pm 9,26	0,865	59	177,98 \pm 27,79	0,077	77	105,8 \pm 11,79	0,196
0,1–0,5	52	41,61 \pm 5,46	0,903	56	78,92 \pm 13,02	0,103	108	55,13 \pm 5,44	0,010
>0,5	37	32,14 \pm 5,61	0,327	39	66,31 \pm 13,19	0,032	76	43,69 \pm 5,58	<0,001

Примечание. * Статистическая значимость различий по сравнению с дозовой группой <0,01 Гр.

Как видно из табл. 2, стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, были статистически значимо выше у мужчин, подвергшихся внешнему γ -облучению в суммарных дозах 0,01–0,05 Гр и 0,1–0,5 Гр ($p=0,004$, $p=0,043$ соответственно). Напротив, у женщин, подвергшихся внешнему γ -облучению в дозах 0,1–0,5 Гр и выше 0,1 Гр, показатели заболеваемости ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, были статистически значимо ниже по сравнению с женщинами, подвергшимися внешнему γ -облучению в суммарных дозах менее 0,01 Гр ($p=0,008$, $p=0,015$ соответственно). При оценке заболеваемости в изучаемой когорте в целом стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, были статистически значимо ниже у работников, подвергшихся облучению в суммарных поглощённых в КМ дозах более 0,5 Гр, по сравнению с теми, кто подвергся облучению в дозе менее 0,01 Гр ($p<0,001$). Статистически значимо повышенные показатели заболеваемости ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, у мужчин, вероятно, можно объяснить значительным вкладом онкологической патологии в развитие ЖДА (среди работников с ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, злокачественные новообразования были выявлены у 234 мужчин и 154 женщин; 45,0 % от всех случаев ЖДА, связанных с сопутствующей соматической патологией), также связанной с воздействием ионизирующего излучения. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [24].

Также, из табл. 2 видно, что стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА неясного генеза у мужчин, подвергшихся внешнему γ -облучению в суммарной дозе 0,01–0,05 Гр, были статистически значимо выше, чем у мужчин, подвергшихся внешнему облучению в дозе менее 0,01 Гр ($p=0,020$). Стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА неясного генеза у женщин, подвергшихся внешнему γ -облучению в суммарной дозе выше 0,5 Гр, были статистически значимо ниже, чем у женщин, подвергшихся внешнему облучению в дозе менее 0,01 Гр ($p=0,032$).

Стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА неясного генеза в изучаемой когорте в целом были статистически значимо выше у работников, подвергшихся внешнему облучению в суммарной дозе 0,01–0,05 Гр ($p=0,006$). В то же время показатели заболеваемости ЖДА неясного генеза у работников, подвергшихся внешнему γ -облучению в суммарной поглощённой в КМ дозе 0,1–0,5 Гр и выше 0,1 Гр, были статистически значимо ниже, чем у тех, кто подвергся внешнему облучению в дозе менее 0,01 Гр ($p=0,010$, $p<0,001$ соответственно).

Результаты анализа заболеваемости как всеми ЖДА, так и отдельными её видами в зависимости от суммарной поглощённой в КМ дозы внутреннего α -излучения представлены в табл. 3.

Показатели заболеваемости ЖДА в целом не зависели от суммарной поглощённой в КМ дозы внутреннего α -излучения, за исключением групп женщин, подвергшихся внутреннему α -излучению в суммарной дозе 0,025–0,05 Гр и 0,05–0,1 Гр. В этих группах женщин стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА были статистически значимо ниже соответствующих показателей у женщин, подвергшихся внутреннему облучению в дозе менее 0,01 Гр ($p=0,025$, $p=0,043$ соответственно). Показатели заболеваемости ЖДА в изучаемой когорте в целом были статистически значимо ниже у работников, подвергшихся внутреннему α -облучению в суммарной поглощённой в КМ дозе более 0,1 Гр, чем у работников, подвергшихся внутреннему α -облучению в дозе менее 0,01 Гр ($p=0,047$).

Как видно из табл. 3, стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА, связанными с сопутствующей соматической патологией, не зависели от суммарной поглощённой в КМ дозы внутреннего α -облучения.

Из табл. 3 следует, что стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА неясного генеза у мужчин, подвергшихся внутреннему α -облучению в суммарной поглощённой в КМ дозе 0,01–0,025 Гр, и у женщин, подвергшихся внутреннему облучению в суммарной дозе 0,025–0,05 Гр, 0,05–0,1 Гр и выше 0,1 Гр, были статистически значимо ниже, чем у работников, подвергшихся внутреннему α -облучению в суммарной дозе менее 0,01 Гр ($p=0,045$, $p=0,041$,

Таблица 3

Показатели заболеваемости ЖДА в зависимости от суммарной поглощённой
в КМ дозы внутреннего α -излучения

Доза облучения, Гр	Мужчины			Женщины			Оба пола		
	Число случаев	Показатель \pm СтОш	p-value *	Число случаев	Показатель \pm СтОш	p-value *	Число случаев	Показатель \pm СтОш	p-value *
Все ЖДА									
<0,01	260	198,3 \pm 10,96	–	334	349,09 \pm 21,87	–	594	261,91 \pm 10,49	–
0,01–0,25	68	193,25 \pm 27,47	0,866	59	255,11 \pm 44,56	0,090	127	217,78 \pm 23,8	0,112
0,025–0,05	50	245,8 \pm 42,5	0,236	37	198,79 \pm 48,86	0,025	87	223,34 \pm 31,91	0,282
0,05–0,1	28	192,23 \pm 46,98	0,901	22	183,85 \pm 63,45	0,043	50	188,45 \pm 37,68	0,105
>0,1	20	140,49 \pm 40,8	0,240	26	245,67 \pm 70,65	0,227	46	185,34 \pm 37,24	0,047
ЖДА, связанные с сопутствующей соматической патологией									
<0,01	178	137,26 \pm 9,06	–	179	176,3 \pm 15,25	–	357	154,41 \pm 7,97	–
0,01–0,025	51	141,05 \pm 23,4	0,879	31	122,53 \pm 30,28	0,162	82	133,43 \pm 18,46	0,322
0,025–0,05	36	171,58 \pm 35,39	0,300	26	129,31 \pm 38,45	0,317	62	150,9 \pm 25,93	0,898
0,05–0,1	21	139,69 \pm 40,11	0,953	14	111,45 \pm 49,03	0,304	35	126,83 \pm 30,86	0,429
>0,1	15	102,11 \pm 34,64	0,391	19	173,79 \pm 58,99	0,967	34	132,7 \pm 31,35	0,531
ЖДА неясного генеза									
<0,01	68	51,4 \pm 5,56	–	125	126,73 \pm 12,94	–	193	83,57 \pm 5,88	–
0,01–0,025	8	23,42 \pm 9,51	0,045	25	102,68 \pm 27,64	0,465	33	56,4 \pm 11,97	0,047
0,025–0,05	8	40,72 \pm 17,2	0,592	9	46,75 \pm 23,14	0,041	17	43,7 \pm 13,94	0,044
0,05–0,1	4	28,48 \pm 18,06	0,353	6	47,72 \pm 31,68	0,029	10	37,57 \pm 16,69	0,048
>0,1	5	36,78 \pm 20,8	0,559	6	55,74 \pm 33,19	0,041	11	45,16 \pm 18,25	0,027

Примечание. * Статистическая значимость различий по сравнению с дозовой группой <0,01 Гр.

$p=0,029$, $p=0,041$ соответственно). Показатели заболеваемости ЖДА неясного генеза были статистически значимо ниже у работников, подвергшихся внутреннему облучению в суммарной дозе выше 0,01 Гр, чем у работников, подвергшихся внешнему облучению в суммарной дозе менее 0,01 Гр ($p<0,05$). Можно предположить, что такие результаты, вероятно, обусловлены небольшой численностью группы работников, подвергшихся внутреннему облучению в суммарных дозах более 0,01 Гр.

В исследовании [25], посвящённом изучению динамики количества клеточных элементов периферической крови у жителей сёл, расположенных на реке Тече, которые подверглись комбинированному (внешнему и внутреннему) облучению, было отмечено значимое снижение среднего количества эритроцитов в период 1951–1956 гг. по сравнению с контрольной группой необлучённых жителей. Так же как и в настоящем исследовании, в работе [25] были выявлены различия в динамике количества эритроцитов между мужчинами и женщинами. На следующих этапах исследования планируется изучение показателей заболеваемости различными БКИКО в зависимости от мощности и суммарной дозы как внешнего γ -, так и внутреннего α -облучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты проведённого исследования показали, что показатели заболеваемости ЖДА зависели как от различных нерадиационных (пол, возраст, календарный период установления диагноза, наличие беременности и сопутствующая соматическая патология), так и радиационных факторов. "Грубые" показатели заболеваемости ЖДА и её отдельными типами увеличивались с увеличением достигнутого возраста как у мужчин, так и у женщин. Стандартизованные показатели заболеваемости ЖДА и её отдельными типами у женщин были статистически значимо выше по сравнению с мужчинами и увеличивались к концу периода наблюдения, за исключением периода 1948–1963 гг. у женщин. Зависимость "доза – эффект" (заболеваемость ЖДА) требует дальнейшего изучения с учётом нерадиационных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ICRP. Statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs – threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. ICRP Publication 118 // Ann ICRP. – 2012. – V. 41. – No. 1/2. – P. 1–322.
2. Гуськова А.К., Байсоголов Г.Д. Оценка состояния здоровья и принципы трудоустройства лиц, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения // Медицинская радиология. – 1968. – Т. 13. – № 5. – С. 3–9.
3. Akleyev A.V., Kossenko M.M., Startsev N.V. Techa River population: long term medical follow up // Br. J. Radiol. – 2002. – No. 26. – P. 32–40.
4. Gidali J. Effects of protracted and chronic irradiation on the haemopoietic system in mouse // Exp. Eye Res. – 2002. – No. 69. – P. 219–235.
5. Guskova A.K., Gusev L.A., Okladnikova N.D. Russian concept of chronic radiation disease in man // Br. J. Radiol. – 2002. – No. 26. – P. 19–23.
6. Окладникова Н.Д., Кудрявцева Т.И., Беляева З.Д. Плутониевый пневмосклероз, итоги многолетнего медицинского наблюдения // Вопросы радиац. безопасности. – 2002. – № 1. – С. 42–49.
7. Seed T.M., Fritz T.E., Tolle D.V., Jackson W.E. 3rd. Haematopoietic responses under protracted exposures to low daily dose gamma irradiation // Adv. Space Res. – 2002. – V. 30. – No. 4. – P. 945–955.
8. Пестерникова В.С., Окладникова Н.Д. Оценка показателей морфологического состава периферической крови у больных хронической лучевой болезнью за 40 лет наблюдения // Вопросы радиац. безопасности. – 2003. – № 3. – С. 60–66.
9. Пестерникова В.С., Окладникова Н.Д. Оценка костномозгового кроветворения у больных хронической лучевой болезнью через 40 лет наблюдения // Вопросы радиац. безопасности. – 2004. – № 4. – С. 41–45.
10. Окладникова Н.Д., Гуськова А.К. Клиническая токсикология соединений плутония и америция // Радиационная медицина. – М.: ИздАТ, 2001. – С. 328–369.
11. Akleyev A.V., Vermeyeva G.A., Silkina L.A., Vozilova A.V. Long-term haemopoiesis and immunity status after chronic radiation exposure of red bone marrow in humans // Centr. Eur. J. Occup.

- Environ. Med. – 1999. – V. 5/ – No. 2. – P. 113–129.
12. Медико-биологические и экологические последствия радиоактивного загрязнения реки Теча / Под ред. А.В. Аклеева, М.Ф. Киселева. – Челябинск: Фрегат, 2002. – 530 с.
13. Аклеев А.В., Варфоломеева Т.А. Состояние гемопоэза в условиях многолетнего облучения костного мозга у жителей прибрежных сёл реки Теча // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2007. – Т. 47. – № 3. – С. 307–321.
14. GBD 2016 Disease and injury incidence and prevalence collaborators. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 328 and injuries for 195 countries, 1990–2016: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2016 // Lancet. – 2017. – V. 390. – No. 10100. – P. 1211–1259.
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 Phys. – 2008. – V. 94. – No. 5. – P. 449–458.
16. Азизова Т.В., Брагин Е.В., Банникова М.В. и др. Описательная характеристика базы данных о системе кроветворения у лиц, подвергшихся хроническому облучению // Вопросы радиац. безопасности. – 2020. – № 2. – С. 66–74.
17. Руководство по Международной статистической классификации болезней, травм и причин смерти. Пересмотр 1975. – Женева: ВОЗ, 1980. – 752 с.
18. Руководство по Международной статистической классификации болезней, травм и причин смерти. Пересмотр 1998. – Женева: ВОЗ, 1999.
19. Zar J.H. Biostatistical analysis. – New Jersey: Prentice Hall, 1999. – 663 p.
20. Camaschella C. Iron deficiency // Blood. – 2019. – V. 133. – No. 1. – P. 30–39.
21. Тихомиров А.Л., Сарсания С.И. Проблема железодефицитной анемии у женщин: пути решения // РМЖ Мать и дитя. – 2020. – Т. 3. – № 1. – С. 44–50.
22. Салов И.А., Лысенко Л.В., Маршалов Д.В., Петренко А.П. Анемия как фактор риска осложнённого течения беременности и исходов родов // Врач-аспирант. – 2014. – Т. 62. – № 1.4. – С. 551–556.
23. Вёрткин А.Л., Румянцев М.А., Скотников А.С. Коморбидность в клинической практике. Часть 1 // Архив внутренней медицины. – 2011. – № 1. – С. 16–20.
24. Орлова Р.В. Практические рекомендации по лечению анемии при злокачественных новообразованиях // Злокачественные опухоли. – 2017. – Т. 7. – № 3. – С. 458–465.
25. Аклеев А.В., Димов Г.П., Варфоломеева Т.А. Состояние кроветворения у жителей прибрежных сёл реки Теча в период максимального радиационного воздействия. Сообщ. 1. Оценка клеточного состава периферической крови и роли сопутствующих заболеваний в угнетении гемопоэза // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2012. – Т. 52. – № 2. – С. 117–129.

ИЛЬИНУ ЛЕОНИДУ АНДРЕЕВИЧУ – 95 ЛЕТ



15 марта 2023 г. исполняется 95 лет академику РАН, Герою Социалистического Труда, лауреату Государственных премий СССР и РФ, дважды лауреату премии Правительства РФ, почётному президенту ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, д.м.н., профессору **Ильину Леониду Андреевичу**.

Л.А. Ильин в 1953 г. с отличием окончил Первый Ленинградский медицинский институт им. И.П. Павлова, а также его военно-морской факультет. В 1955 г. в период службы на Черноморском флоте в должности начальника медицинской службы боевого корабля организовал первую на ЧФ радиологическую лабораторию. После демобилизации (с 1958 по 1961 гг.) работал старшим научным сотрудником в радиобиологическом отделе одного из НИИ Военно-морского флота (г. Ленинград).

Принимал участие в испытаниях ядерного оружия на Новой Земле и Семипалатинском полигоне.

С 1961 по 1968 гг. был руководителем лаборатории радиационной защиты и заместителем директора по научной работе Ленинградского НИИ радиационной гигиены.

В 1968 г. профессор Л.А. Ильин в 40-летнем возрасте возглавил крупнейший в мире научный центр в области радиобиологии, радиационной медицины и радиационной безопасности – Институт биофизики МЗ СССР, которым он руководил в течение сорока лет. За заслуги перед государством в 1977 г. Институт биофизики был награждён орденом Ленина.

В настоящее время академик Л.А. Ильин – почётный президент Федерального государственного бюджетного учреждения "Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна" (объединённого ГНЦ РФ Института биофизики ФМБА России и клинической больницы № 6 ФМБА России).

Основные научные интересы Л.А. Ильина связаны главным образом с вопросами токсикологии радиоактивных продуктов деления урана и плутония и исследований в области медицинской средств защиты от их воздействия на организм; создания лекарственных препаратов и медико-биологических систем защиты от γ - и γ -нейтронного излучений. Разработанные лекарственные препараты и системы защиты внедрены в атомной промышленности, атомном подводном флоте и в ракетных войсках стратегического назначения. Многие из этих разработок проверены в реальных условиях Семипалатинского полигона, где Л.А. Ильин был научным руководителем соответствующих радиобиологических опытов.

Как участник работ на двух атомных полигонах СССР он является ветераном подразделений особого риска.

Академик Л.А. Ильин вместе с сотрудниками впервые в мире в 1970 г., т. е. за 16 лет до аварии на ЧАЭС, создал "Методические указания для разработки мероприятий по защите населения в случае аварии ядерных реакторов" и обосновал аварийные нормативы облучения людей в этих ситуациях.

В последние годы Леонид Андреевич много внимания уделяет задачам обеспечения безопасности населения и профессионалов в связи с увеличением энерго мощностей АЭС в стране, созданием плавучих АЭС и проблемам радиологического терроризма.

С первых дней чернобыльской аварии Л.А. Ильин находился в очаге катастрофы, где, будучи научным руководителем работ по защите ликвидаторов и населения, принимал ответственные решения. По поручению Н.И. Рыжкова он осуществлял координацию медико-биологических и

радиационно-гигиенических задач, включая проблемы эвакуации населения.

В начале мая 1986 г. Рыжков был очень обеспокоен выходящей из под контроля ситуацией в г. Киеве. 7 мая 1986 г. академик Л.А. Ильин и академик Ю.А. Израэль, находясь на аварийной ЧАЭС, были приглашены на заседание Политбюро ЦК компартии Украины, где стоял вопрос об эвакуации трёхмиллионного населения г. Киева. Л.А. Ильиным и Ю.А. Израэлем на основании дозиметрических данных были сделаны научные прогнозы и доказана несостоятельность и опасность принятия подобного решения.

Как известно, прогноз Л.А. Ильина и Ю.А. Израэля и их категорическое возражение против эвакуации г. Киева полностью подтвердились и оправдали себя. Интересная деталь этого, без сомнения, судьбоносного события. Ночью 7 мая 1986 г. Ильин и Израэль свою позицию изложили и подписали в единственном экземпляре документ, который первый секретарь ЦК компартии Украины В.В. Щербицкий назвал документом исторической и особой важности и при всех членах ПБ ЦК Украины и его авторах положил в свой сейф. Спустя несколько лет после развала СССР во время интервью Ю.А. Израэля японской телекомпании по вопросам Чернобыля, японский корреспондент продемонстрировал Ю.А. Израэлю оригинал (!) этого документа. Ю.А. Израэль снял его ксерокопию (!), а оригинал остался у японцев...

Академик Л.А. Ильин в течение более 30 лет представлял СССР и Российскую Федерацию в Научном комитете ООН по действию атомной радиации. Дважды избирался членом Главного комитета Международной комиссии по радиационной защите, которая определяет всю научно-техническую политику в мире в области радиационных проблем и нормирования ионизирующих излучений.

В 1980 г. в Женеве трое отечественных учёных (Е.И. Чазов, Л.А. Ильин, М.И. Кузин) и трое американских учёных (Б. Лаун, Э. Чеван, Г. Миллер) создали международное движение "Врачи против ядерной войны". В 1985 г. это движение из ста номинантов было удостоено Нобелевской премии мира. В 1982 и 1984 гг. двумя изданиями на пяти языках вышла книга Е.И. Чазова, Л.А. Ильина, А.К. Гуськовой "Опасность ядерной войны: точка зрения советских учёных-медиков", в которой, в частности, были опубликованы расчётные оценки Л.А. Ильина, впервые доложенные на I конгрессе этого Движения в 1981 г. о возможных медицинских последствиях термоядерной войны на Европейском континенте от Атлантического океана до Уральских гор. Эти впервые в мире представленные научные данные доказали невозможность достижения победы в такой войне. Общеизвестно, что они сыграли большую позитивную роль в руководящих кругах ядерных государств и, в частности, в США.

Л.А. Ильин автор и соавтор 20 книг, в том числе таких как фундаментальные монографии: "Основы защиты организма от воздействия радиоактивных веществ", "Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры" (после её публикации в 2001 г. уже в 2002 г. она была издана в Японии на родном языке, переведена и издана на английском языке). Монография "Реалии и мифы Чернобыля" вышла двумя изданиями и опубликована на японском и английском языках, а монография "Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности" (изданной также в США) оказалась настольной книгой учёных и специалистов в области изучения и ликвидации последствий Чернобыльской аварии.

Под его научной редакцией и в соавторстве издано 4-томное "Руководство по радиационной медицине" объёмом в 100 печатных листов, а в 2017 г. – учебник "Радиационная гигиена" в соавторстве с профессорами И.П. Коренковым и Б.Я. Наркевичем, который по заключению специалистов должен стать настольной книгой не только для медиков, но и для всех учёных и практиков в области радиационной защиты и безопасности.

После того как в США было создано нейтронное оружие, направленное против СССР, Л.А. Ильин в соавторстве с политологом Т.Ф. Дмитричевым опубликовал в 1985 г. книгу под названием "Против нейтронной смерти", в которой подробно рассмотрел поражающее действие нейтронного оружия и доказал его изуверские последствия не только для людей, но и для биосферы.

В 1978 г. Л.А. Ильин был избран действительным членом Академии медицинских наук СССР,

с 1980 по 1984 гг. состоял членом Президиума, а с 1984 по 1990 гг. был вице-президентом АМН СССР.

За научные исследования и практические разработки в области защиты персонала, населения, а также личного состава вооружённых сил от воздействия радиации академик Л.А. Ильин удостоен Ленинской премии, Государственных премий СССР и Российской Федерации и дважды премии Правительства Российской Федерации.

В 1988 г. за заслуги в области науки о действии радиации на организм человека и радиационной защиты Л.А. Ильин был удостоен звания Героя Социалистического Труда с вручением ему ордена Ленина и "Золотой Звезды".

Л.А. Ильину объявлены в 1998 г., 2003 г. и 2014 г. благодарности Президентов РФ за большой вклад в развитие отечественной науки в области радиационной защиты и за заслуги в развитии здравоохранения, медицинской науки и многолетнюю плодотворную трудовую деятельность.

В 2021 г. награждён Почётной грамотой Президента РФ за заслуги в области здравоохранения и многолетнюю добросовестную работу.

В 2022 г. Президент РФ В.В. Путин вручил Леониду Андреевичу орден Александра Невского. Имеет ведомственные награды министра здравоохранения, нагрудные знаки Росатома "И.В. Курчатов" 1 степени, "Е.П. Славский".

Будучи членом интеллектуально-делового клуба Н.И. Рыжкова награждён орденами Петра Великого I степени и Дмитрия Донского. В 2013 г. стал лауреатом международной премии Андрея Первозванного "Вера и верность" за выдающийся вклад в развитие отечественной науки, спасение человеческих жизней, многолетний труд в деле укрепления мира.

Академик Л.А. Ильин – признанный мировой авторитет в области радиобиологии и радиационной медицины. Характерной чертой Л.А. Ильина как учёного является его бескомпромиссность в вопросах отстаивания ценностей истинной науки на фоне невежества и сиюминутной конъюнктуры. Проницательность, смелость и принципиальность в принятии решений в сложных экстремальных условиях, умение отстаивать свою научную и гражданскую позицию снискали Л.А. Ильину высокий авторитет в международных научных кругах и глубокое уважение его коллег и соратников.

Примите наши поздравления по случаю Вашего юбилея и сердечные пожелания крепкого здоровья и активной творческой деятельности.

Руководство и коллектив ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России
Редколлегия журнала "Вопросы радиационной безопасности"

К 120-ЛЕТИЮ ИГОРЯ ВАСИЛЬЕВИЧА КУРЧАТОВА И АНАТОЛИЯ ПЕТРОВИЧА АЛЕКСАНДРОВА



"Я счастлив, что родился в России и посвятил свою жизнь атомной науке Страны Советов".

И.В. Курчатов

В январе 2023 г. научная общественность отметила 120 лет со дня рождения великого учёного **Игоря Васильевича Курчатова**, которому принадлежит исключительная роль в разработке научных и научно-технических проблем овладения ядерной энергией в Советском Союзе. В Игоре Васильевиче воплотились лучшие черты учёного нашей страны – горячий патриотизм, коллективизм, широкая научная эрудиция, чрезвычайно развитое чувство нового, талант руководителя.

Советская школа изучения атомного ядра возникла у нас не в 1943 г., когда, в соответствии с решением ГКО от 11 февраля 1943 г. о развёртывании работ по урановому проекту, И.В. Курчатов был назначен научным руководителем работ по использованию атомной энергии, а гораздо раньше, в начале 1930-х гг. В ряду первых исследователей строения атомного ядра был и И.В. Курчатов, ведавший тогда отделом общей физики Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ). Результаты научных работ сотрудников ЛФТИ и других научных учреждений регулярно докладывались на всесоюзных конференциях и совещаниях. Все они проходили с участием выдающихся зарубежных учёных и получали широкий отклик в мировой прессе. На конференции 1940 г. И.В. Курчатов в своём докладе о делении тяжёлых ядер вплотную подошёл к проблемам практического осуществления цепной ядерной реакции в уране как с замедлителем, так и без него, что означало теоретическое обоснование возможности создания ядерных реакторов и ядерного оружия.

В 1943 г. ему были предоставлены чрезвычайные полномочия и всемерная поддержка правительства страны. Согласно распоряжению № 121 Академии наук СССР, под его руководством в 1943 г. была создана Лаборатория № 2, получившая 5 февраля 1944 г. права академического института. 1945 г. ознаменовался пуском циклотрона, построенного всего лишь за год.

25 декабря 1946 г. в Москве заработал созданный И.В. Курчатовым и его сотрудниками первый на евро-азиатском континенте физический реактор "Ф-1", на котором был получен первый в нашей стране образец плутония. Пуск первого физического ядерного реактора – крупнейшее достижение отечественной науки и техники – имел решающее значение для всего атомного проекта и послужил основой для разработки целой серии промышленных ядерных реакторов. 19 июня 1948 г. на Южном Урале (на площадке нынешнего ФГУП "ПО "Маяк") И.В. Курчатов осуществил пуск первого промышленного реактора "А", выведя его на проектную мощность.

29 августа 1949 г. в СССР на Семипалатинском полигоне в казахстанской степи был осуществлён взрыв первой атомной (плутониевой) бомбы "РДС-1". А ещё через четыре года, 12 августа 1953 г., прошло успешное испытание теперь уже первой в мире водородной бомбы.

Пуск первого советского реактора, создание промышленных установок по производству делящихся материалов, испытания первых урановых, а затем и водородных бомб, ввод в строй первой в мире атомной электростанции, блистательное начало исследований управляемых термоядерных реакций – всё это вместилось в отрезок времени, немногим превышающий десятилетие.

Можно представить, каким величайшим наполнением и напряжением отличалась деятельность И.В. Курчатова, решавшего самые разнообразные проблемы практически одновременно. Сколько для этого требовалось сил и энергии, желания и вдохновения!

Жизнь И.В. Курчатова – непрерывный трудовой и научный подвиг!

К 120-летию со дня рождения Игоря Васильевича Курчатова Губернатором Челябинской области утверждён План реализации на территории Челябинской области мероприятий, приуроченных к праздничной дате.

Планом предусмотрено проведение таких мероприятий как: Международная научно-практическая конференция "Хроническое радиационное воздействие; отдалённые медико-биологические эффекты"; отраслевой научный форум студенческой молодежи "Дни Российской науки–2023"; тематические уроки "Наш земляк И.В. Курчатов", "История развития и современные проблемы атомной отрасли"; научно-техническая инженерная смена "Юниоры "Росатома", экскурсионные программы в МКУ "Историко-краеведческий музей" (г. Сим) и Дом-музей И.В. Курчатова (г. Озёрск).

Планом также предусмотрено проведение в 2023 г. совместно с Госкорпорацией "Росатом" Регионального форума-диалога "Национальный интерес, экология, безопасность". В форуме планируется участие руководителей Госкорпорации "Росатом", представителей федеральных и региональных государственных органов власти, учёных, общественности, преподавателей и студентов высших учебных заведений.

В рамках программы форума планируются секционные заседания и круглые столы по направлениям: реализация экологической политики Госкорпорации "Росатом" и её организаций; эволюция общественных представлений и требований безопасности; государственная система обращения с отходами I и II классов опасности; роль атомных городов в достижении технологического суверенитета России; новая повестка развития территорий присутствия атомной отрасли в контексте ТОСЭР; 120 лет академику И.В. Курчатову – масштаб личности в истории; 75 лет ФГУП "ПО "Маяк": ступени роста.



Анатолий Петрович Александров принадлежит к замечательной плеяде отечественных учёных XX века, создавших научно-технический, экономический, интеллектуальный и оборонный потенциал Советского Союза. Самую широкую известность и признание учёный получил как блестящий руководитель и координатор крупных коллективов атомной промышленности, энтузиаст и организатор науки и техники.

А.П. Александров начинал свою самостоятельную работу ещё в Киевском рентгеновском институте под научным руководством профессора В.К. Роше. Эти исследования обратили на себя внимание академика А.Ф. Иоффе, который пригласил молодого учёного в Ленинградский физико-технический институт (ЛФТИ). Там с 1930 г. А.П. Александров в течение десяти лет, развернув комплексные исследования в области физических свойств различных высокомолекулярных веществ, создал новые разделы современной науки о полимерах, определивших на долгие годы вперёд пути развития многих научных направлений в Советском Союзе.

В годы Великой Отечественной войны А.П. Александров сблизился с коллегой по ЛФТИ И.В. Курчатовым в рамках разработки методов и технологий размагничивания судов для военно-морского флота, а позже стал ближайшим соратником Игоря Васильевича в ходе реализации атомного проекта СССР.

В 1946 г. А.П. Александров был назначен директором Института физических проблем АН СССР, где им был выполнен комплекс сложнейших работ по получению дейтерия, трития, а также разделения изотопов урана для атомной промышленности.

С 1948 г. А.П. Александров принимает активное участие в разработке промышленных реак-

торов, первым из которых стал уран-графитовый реактор для наработки оружейного плутония "А" на Комбинате № 817 (ныне ФГУП "ПО "Маяк"). Именно на реакторах такого типа в СССР был наработан запас плутония, обеспечивший ядерный паритет с США.

В дальнейшем А.П. Александров и его коллеги разработали ряд перспективных проектов ядерных реакторов различного назначения, в том числе для атомных подводных лодок (АПЛ). Деятельность академика А.П. Александрова по созданию корабельной атомной энергетики для ВМФ СССР и России, продолжавшаяся более 40 лет, обеспечила строительство могучего отечественного ракетно-ядерного флота, способного защищать интересы государства в любых районах Мирового океана.

Одновременно с сооружением АПЛ шли работы по созданию ледокольного атомного флота. При жизни учёного было построено восемь атомных ледоколов, открывших новую эпоху в перевозках по Северному морскому пути и устьям сибирских рек.

А.П. Александров на протяжении десятилетий был научным руководителем важнейших научно-технических программ развития гражданской атомной энергетики, где были созданы и внедрены энергетические реакторы различной конфигурации для России и стран дальнего зарубежья.

Вся научная деятельность А.П. Александрова была связана с Академией наук СССР. На посту Президента АН СССР проявились его лучшие качества учёного и человека: широчайшая научная эрудиция, высокая ответственность, принципиальность и доброжелательность. Вся жизнь А.П. Александрова была подчинена служению науке и государству, научно-техническому развитию страны.

Администрациями городов Челябинска, Озёрска, Снежинска, учреждениями образования и культуры Челябинской области на официальных сайтах и в общественных пространствах размещены материалы, представленные ФГБУ "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", к 120-летию со дня рождения академика А.П. Александрова.

В частности, в Челябинске в историческом парке "Россия – моя история" организована выставка "Наука побеждает: атомные маршалы Советского Союза", в муниципальных библиотеках города проходят книжно-иллюстративные выставки об истории развития отечественной атомной промышленности, на пешеходной улице открыта стендовая выставка "Аллея науки", в Снежинском городском музее проходят лекции "Апостолы атомного века", также материалы размещены на официальных сайтах бюджетных учреждений Озёрского городского округа.



*Из воспоминаний А.К. Гуськовой
о И.А. Курчатове и А.П. Александрове*

Выдающийся советский и российский врач-радиолог, профессор, член РНКРЗ, эксперт НКДАР при ООН, член-корреспондент Академии медицинских наук Гуськова Ангелина Константиновна была лечащим врачом И.В. Курчатова и А.П. Александрова, долгое время работала с ними вместе и лично хорошо их знала.

В своих воспоминаниях* А.К. Гуськова так пишет о И.В. Курчатове: "...Настоящий большой учёный, руководитель, должен хорошо знать прошлое и думать не о сегодняшнем дне, а о будущем. Обращённые в будущее замыслы Игоря Васильевича – это и целевые реакторы для теплоснабжения, реакторы-опреснители, реакторы-размножители, это проблема управляемого термоядерного синтеза, создание сложных ускорителей и др. Сегодня, говоря о развитии всех этих научно-технических направлений, мы вспоминаем, что у их истоков стоял И.В. Курчатов. Но, наверное, самое главное даже

* Гуськова А.К. Атомная отрасль страны глазами врага. – М.: Реальное время, 2004. – 240 с.

не в этом. Он создал макет, или как это модно теперь говорить, алгоритм формирования сложной наукоёмкой отрасли промышленности, охватывающей многоотраслевую техническую базу, комплекс научных учреждений отраслевой направленности, включающий биологию и медицину, и, наконец, сами принципы формирования и динамического управления коллективом с блестящим конечным эффектом его деятельности, для укрепления хозяйственного могущества страны.

Игорь Васильевич и его соратники показали образец достойного облика научно-производственного коллектива. Счастлива та страна, в которой появится подобное этому созвездие представителей фундаментальных и прикладных наук, объединённых подлинно приоритетной для человечества, общей и достаточно сложной целью.

Предостерегал Игорь Васильевич и от слепого подражания сделанному где-то, в том числе и за рубежом, ранее: "нужно не догонять, а обгонять", – любил говорить он".

Вспоминая об А.П. Александрове, Ангелина Константиновна писала: "...Я всегда воспринимала Анатолия Петровича, как Главного инженера атомной отрасли и в создании атомной промышленности, и в оснащении ядерными установками флота, с которым он активно сотрудничал ещё со времен Великой Отечественной войны. Именно эта ответственная роль в воплощении теоретических замыслов учёных-физиков и конструкторов в техническом изделии в условиях крайней срочности, иногда, наверное, при недостаточной предварительной проработке решения (на "черновики" и опытные образцы не доставало не только времени, но и ресурсов) налагала особый отпечаток на личность Анатолия Петровича и на его общение с окружающими. Свои решения, точку зрения в беседах с коллегами (свидетелем чего я была на совещаниях в коттедже, на встречах в "гостинице академиков" на Урале) формулировал очень кратко, резковато – как бы на выходе из скрытого трудного раздумья, ещё внутренне, может быть не завершённого, но вынужденно срочного и категоричного, чтобы можно было "сразу начать делать то, что нужно".

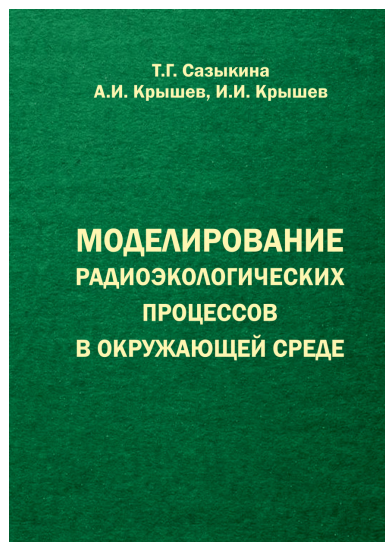
На всех, кто работал с ним рядом, лежал отблеск этой яркой личности, им были присущи (как и тем, кто продолжает трудиться) общий с Анатолием Петровичем стиль неброской ответственности в работе, полной самоотдачи, критического отношения к сделанному, особый тон общения, чувство достоинства и взаимного уважения, высокое понятие государственности.

Думаю, что роль Анатолия Петровича в создании атомной промышленности и в энергетике страны, его личность должна стать примером для молодого поколения".

"...Игорю Васильевичу и Анатолию Петровичу всегда были присущи критическое отношение к, казалось бы, незыблемым постулатам, к самой привлекательной, в том числе зарубежной, информации, ответственность суждений, честность и объективность анализа. Всё это так нужно нам сегодня!

Склоним голову перед памятью И.В. Курчатова и А.П. Александрова, торжественно отметим их юбилеи и с благодарностью скажем, что эти люди жили среди нас".

НОВЫЕ КНИГИ

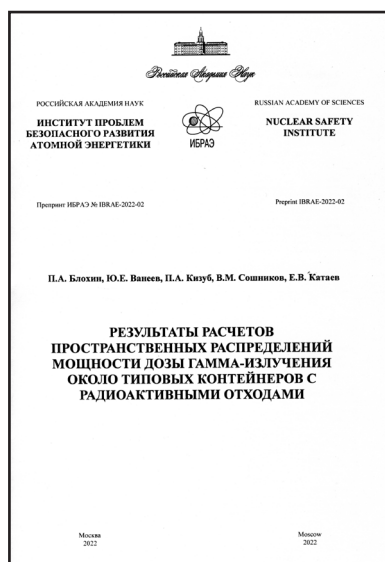


Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. *Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде.* – М.: ООО "Маска", 2022. – 638 с.

В монографии дано систематическое изложение нелинейных математических моделей, позволяющих прогнозировать динамику процессов миграции и накопления радионуклидов в окружающей среде и пищевых цепях экосистем. Рассмотрены практические приложения методов моделирования для реконструкции и прогноза реальных радиоэкологических ситуаций – крупных радиационных аварий и загрязнённых территорий. Сформулированы экспериментальные и теоретические основы методологии радиационной защиты природной биоты при радиоактивном загрязнении окружающей среды. Разработаны новые аналитические методы расчёта дозовых нагрузок на организмы биоты. Представлены математические модели, позволяющие прогнозировать развитие радиационных эффектов в природных экосистемах при хроническом или остром радиационном воздействии в сочетании с экологическими процессами. Даны оценки экологического риска в

ситуациях радиационных аварий и хронического загрязнения территорий.

Для научных работников и специалистов в области мониторинга и охраны окружающей среды, аварийного реагирования и прогнозирования радиационной обстановки, радиоэкологии, экологической безопасности ядерной энергетики.



Блохин П.А. *Результаты расчетов пространственных распределений мощности дозы гамма-излучения около типовых контейнеров с радиоактивными отходами* / П.А. Блохин, Ю.Е. Ванеев, П.А. Кизуб, В.М. Сошников, Е.В. Катаев. – (Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № IBRAE-2022-02). – М.: ИБРАЭ РАН, 2022. – 30 с. – Библиогр.: 14 наим.

Представлены выполненные с использованием программы TDMCC результаты расчётов пространственных распределений мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения вблизи типовых контейнеров ("биг-бэг", "бочка", КМЗ, НЗК), наиболее часто используемых для перевозки или хранения радиоактивных отходов (РАО). Рассмотрены варианты загрузки контейнеров различными РАО (лёгкий бетон, пористый бетон, грунт и грунт навалом), содержащими радионуклиды ^{137}Cs и ^{60}Co .

Значения МЭД, представленные в табличном и графическом видах, соответствуют точкам на поверхности контейнеров и на расстояниях до двух метров в радиальном и аксиальном направлениях при нормировках на удельную и интегральную активности радионуклидов. Приведены примеры использования этих норми-

рованных величин для определения МЭД на различных расстояниях от поверхности контейнеров при вариациях входных данных.



Чеботина М.Я. *Мониторинг трития в водных средах Уральского региона: монография* / отв. ред. Е.В. Поляков. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2022. – 120 с.
ISBN 978–5–7996–3519–0

В монографии обобщены результаты многолетних исследований загрязнения тритием природных водных сред на территории Уральского региона. В фокусе внимания зоны воздействия крупных энергетических объектов – Производственное объединение "Маяк" и Белоярская АЭС им. Курчатова. Приводятся данные о надфоновом загрязнении тритием природных объектов и сред, испытывающих воздействие атомных предприятий по сравнению с контрольными территориями. Рассматривается загрязнение водоёмов, рек, болот, дождевых осадков, снежных выпадений, источников питьевого водоснабжения, мочи людей.

Для специалистов-радиоэкологов и гигиенистов, преподавателей и студентов экологических специальностей, широкого круга читателей, интересующихся экологическими проблемами Уральского региона.

RADIATION SAFETY PROBLEMS

Scientific Journal

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

№ 1 (109) 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, A.V. Trapeznikov,
S.S. Utkin, A.P. Khomyakov, V.F. Khokhryakov, Ye.A. Shishkina, S.V. Yudintsev

CONTENTS

1. GENERAL ISSUES OF RADIATION SAFETY

Ye.M. Melikhova. ICRP Is Preparing the Next Revision of the Radiological Protection System 3

2. RADIATION SAFETY

N.A. Kuznetsova, I.A. Orlova, O.A. Sakhnenko. Use of High-Quality Personal Protective Equipment as a Priority for Ensuring Safety of Nuclear Industry 9

3. RADIOACTIVE WASTE & ENVIRONMENT

Yu.G. Mokrov. Study of Parameters of the Source of Activation Radionuclide Intake to the Techa River 14

V.G. Gorodetsky, A.V. Trapeznikov, V.N. Trapeznikova, A.V. Korzhavin. Comparative Assessment of Radiation Exposures of the Fish Fauna of the Ob-Irtysh River System and the Beloyarsk Reservoir (Cooling Pond of the Beloyarsk NPP) 30

4. RADIATION EXPOSURE & HUMAN HEALTH

N.I. Atamanyuk, Ye.V. Styazhkina, A.A. Peretykin, N.A. Obvintseva, S.S. Andreyev, A.Ye. Aldibekova, G.A. Tryapitsyna, Ye.A. Pryakhin. Experimental Model for Evaluation of Personalized Human HSC Response to Ionizing Radiation in Vivo 40

M.V. Bannikova, V.L. Rybkina, T.V. Azizova, Ye.S. Grigoryeva. Non-Melanoma Skin Cancer Incidence in Workers Chronically Exposed to Ionizing Radiation 52

CONTENTS	
Yu.V. Tsareva, P.V. Okatenko. Mortality Structure of Ozyorsk Population in 1948–2013	60
Ye.V. Bragin, M.V. Bannikova, T.V. Azizova, A.V. Korobkin. Iron Deficiency Incidence Rates in Individuals Occupationally Exposed to Chronic Ionizing Radiation	67
5. INFORMATION & PERSONALIA	
To the 95 th Anniversary of L.A. Ilin's birth	78
To the 120 th Anniversary of the birth of I.V. Kurchatov and of A.P. Alexandrov	81
New Books	85
CONTENTS	87
ABSTRACTS	89
Information about Authors	93

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

ICRP IS PREPARING THE NEXT REVISION OF THE RADIOLOGICAL PROTECTION SYSTEM

Ye.M. Melikhova

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

In 2021, ICRP announced the need to revise its general recommendations of 2007 and presented the future work program. The article briefly discusses the focus areas related to revision of the scientific core of the current radiation protection system and examines new social and humanitarian approaches to improvement of efficiency of the system practical application. The article conclusion paragraphs contain consideration of the causes leading to the long-term stagnation of the Russian legal and regulatory framework in the field of radiation safety.

KEYWORDS: ICRP, SYSTEM OF RADIOLOGICAL PROTECTION, SCIENTIFIC CORE OF THE RADIOLOGICAL PROTECTION SYSTEM, ETHICS OF THE RADIOLOGICAL PROTECTION, PRACTICAL IMPLEMENTATION OF RADIOLOGICAL PROTECTION, FEDERAL LAW ON RADIOLOGICAL PROTECTION OF THE POPULATION

USE OF HIGH-QUALITY PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT AS A PRIORITY FOR ENSURING SAFETY OF NUCLEAR INDUSTRY

N.A. Kuznetsova, I.A. Orlova, O.A. Sakhnenko

FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia

The paper contains information on activities of the Mayak laboratory for testing radionuclide products. It considers the main methods used for certification testing of personal protective equipment in accordance with the scope of accreditation. The procedure is presented for testing prototypes of personal protective equipment and dermatological agents in the absence of certificates of conformity in the field of atomic energy use available for these products. It is noted that one of the areas of the laboratory activity is participation of its personnel in the development and revision of state standards related to methods of PPE testing for certification in the field of atomic energy use. Laboratory employees are members of the working group established at the leading organization for standardization. The laboratory activity allows finding appropriate approaches to assessment and certification of high-quality PPE and ruling out the use of products from unscrupulous manufacturers at Rosatom enterprises.

KEYWORDS: PERSONAL PROTECTIVE EQUIPMENT, CERTIFICATION OF PRODUCTS, DERMATOLOGICAL AGENTS, TESTING LABORATORY, STATE STANDARDS

STUDY OF PARAMETERS OF THE SOURCE OF ACTIVATION RADIONUCLIDE INTAKE TO THE TECHA RIVER

Yu.G. Mokrov

FSUE Mayak PA, Ozyorsk, Russia

In the 1950s, the V-2 Reservoir (Kyzyltash Lake) was used for cooling the commercial uranium-graphite reactors (PUGRs). Lake water passed through the PUGR's core and accumulated activation radionuclides generated due to nuclear reactions occurring as a result of interaction of reactor neutrons and nuclei of waterborne chemical elements. Specific activity of activation radionuclides in water of the V-2 Reservoir depended on the concentration of chemical elements in the water body. Information on the content of 16

chemical elements in water of the V-2 Reservoir was collected and analyzed for the period of 1948–1956, taking into account their characteristic natural content in water of the Irtyash-Kasli lake system as well as additional anthropogenic contamination of the reservoir during its operation. It is demonstrated that the primary source of activation radionuclide intake from the V-2 Reservoir to the Techa River was the controlled discharge of water via open stop logs of the P-2 Dam (or uncontrolled seepage of water through closed stop logs). Mathematical model was proposed, and specific activity of the Reservoir V-2 water was calculated in terms of 16 chemical elements and 31 nuclear reactions leading to generation of 20 activation radionuclides. The model was verified using archival results of phosphorus-32 (^{32}P) specific activity measurements carried out in the V-2 Reservoir during 1953–1956. It is shown that all calculated results are consistent with experimental data. Parameters of the source of activation radionuclide intake from the V-2 Reservoir to the Techa River, which depended on the water flow passed via the P-2 Dam, were determined. Experimental data related to the scale of ^{32}P specific activity distribution along the Techa River were considered. The obtained results allow taking into account the contribution of activation radionuclides to the total radioactive contamination of the river and assessing possible radiological impact on the population and biota.

KEYWORDS: TECHA RIVER, KYZYLTAŞ LAKE, V-2 RESERVOIR, COMMERCIAL GRAPHITE-URANIUM REACTOR, CIRCULATING WATER SUPPLY, ACTIVATION RADIONUCLIDES, WATER FLOW, SPECIFIC ACTIVITY, PHOSPHOROUS-32

COMPARATIVE ASSESSMENT OF RADIATION EXPOSURES OF THE FISH FAUNA OF THE OB-IRTYSH RIVER SYSTEM AND THE BELOYARSK RESERVOIR (COOLING POND OF THE BELOYARSK NPP)

V.G. Gorodetsky, A.V. Trapeznikov, V.N. Trapeznikova, A.V. Korzhavin
Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

The paper presents a comparative analysis of dose rates for fish inhabiting the Ob River and the Beloyarsk Reservoir (that is the cooling pool of the Beloyarsk NPP). Results of radioecological monitoring of the Ob-Irtysh river system and Beloyarsk Reservoir cover the periods of 2004–2017 and 1977–2019, respectively. It has been shown that the fish fauna exposure to radiation in the Ob River within the boundaries of the Khanty-Mansiysky (2004–2010) and Yamalo-Nenetsky (2014–2017) Autonomous Okrugs (i.e. federal subjects of the Russian Federation) was quite stable throughout the research period, and the main contributor to the doses was ^{90}Sr accumulated in the fish. As for the Beloyarsk Reservoir, the fish fauna exposure predominantly depended on the reactor types that were operated during that period at the Beloyarsk NPP. Higher radiation exposures (due to external exposure to ^{137}Cs) were registered during the operation of the first two reactors AMB-100 and AMB-200. The minimum level of radiation exposure is currently observed during operation of the BN-600 and BN-800 reactors. As the content of ^{137}Cs in all components of the cooling pond declined, ^{90}Sr contribution to the exposure dose (particularly internal exposure dose) increased, especially in predatory species as a result of ^{90}Sr ingestion with contaminated fish.

KEYWORDS: ANTHROPOGENIC RADIONUCLIDES, FISH FAUNA, DOSE RATE, ROSATOM FACILITIES, OB RIVER, BELOYARSK RESERVOIR

EXPERIMENTAL MODEL FOR EVALUATION OF PERSONALIZED HUMAN HSC RESPONSE TO IONIZING RADIATION IN VIVO

N.I. Atamanyuk^{1,2}, Ye.V. Styazhkina^{1,2}, A.A. Peretykin¹, N.A. Obvintseva¹, S.S. Andreyev¹, A.Ye. Aldibekova¹, G.A. Tryapitsyna^{1,2}, Ye.A. Pryakhin¹

¹FSBIS Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk, Russia

²FSFSI HE Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Assessment of personalized radiation sensitivity is an important task for the purposes of radiation protection of professionals and for minimizing the development of radiation-induced complications in healthy tissues during radiation therapy. An experimental model has been developed to evaluate the personalized response of human HSC to ionizing radiation. The model for evaluating a personalized response to radiation includes isolation of HSCs from peripheral blood by immunomagnetic separation, intraosseous administration of HSCs into the large femur in mice with severe combined immunodeficiency (for example, NOD SCID), animal irradiations immediately after cell transplantation, measurement of the proportion of HSCs (CD45^{low}CD34⁺ cells) among all human leukocyte (CD45^{low/+}) cells in the tibia on days 3 and 14 after irradiation; calculation of the ratio of the proportion of HSC on the 14th day to this indicator on the 3rd day (coefficient $K_{14/3}$). The model is able to register individual differences in this coefficient. A higher coefficient value is associated with a higher radiation resistance.

KEYWORDS: HEMATOPOIETIC STEM CELLS, ACUTE RADIATION SYNDROME, IONIZING RADIATION, RADIATION SENSITIVITY, HUMANIZED MICE

NON-MELANOMA SKIN CANCER INCIDENCE IN WORKERS CHRONICALLY EXPOSED TO IONIZING RADIATION

M.V. Bannikova, V.L. Rybkina, T.V. Azizova, Ye.S. Grigoryeva

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

The study aimed to assess incidence risks of non-melanoma skin cancer (NMSC) in workers chronically exposed to occupational ionizing radiation. NMSC incidence was analyzed in the cohort of workers hired by a nuclear production enterprise in 1948–1982 (22,377 workers; with females making 25.4 % of the cohort). Crude and age-standardized rates of NMSC incidence were calculated per 1,000 workers. NMSC incidence rates were estimated in relation to sex, attained age, calendar period of diagnosis and cumulative skin absorbed gamma dose from external exposure. Growth of incidence rate was assessed. The number of NMSC cases diagnosed in the worker cohort under study over the entire follow-up period was 346. NMSC incidence rates were increasing with the increase of the attained age of the workers. Standardized NMSC incidence rate was 0.63 ± 0.04 per 1,000 individuals in males and 0.50 ± 0.05 per 1,000 individuals in females. The statistically significant linear trend of increase in NMSC incidence rates was found in males over the entire follow-up period and in females over the period till 1994. The growth of incidence between 1948–1973 and 1974–1993 was higher in males than in females. During 1994–2018, the absolute growth of NMSC incidence both for males and females was due to changes in the age structure of the cohort under study and due to the higher chance to develop the disease. NMSC incidence rates were found to differ significantly depending on the cumulative skin absorbed gamma dose from external exposure.

KEYWORDS: NON-MELANOMA SKIN CANCER, INCIDENCE, GROWTH RATE, CHRONIC OCCUPATIONAL EXPOSURE TO IONIZING RADIATION

MORTALITY STRUCTURE OF OZYORSK POPULATION IN 1948–2013

Yu.V. Tsareva, P.V. Okatenko

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

Mortality in employable population is one of the topical problems indicating the need to assess demographic decline and socio-economic impacts. This work presents analysis of the mortality structure for population of Ozyorsk (that was founded in the vicinity of the Mayak nuclear facility 70 years ago) for the period of 1948–2013.

Contribution of all-malignant-neoplasms mortality among the town residents was slightly increased as compared with the similar characteristic for the entire population of the Russian Federation. Circulatory diseases, neoplasms, injuries and intoxications dominated among the causes of death. Moreover, it should be noted that the mortality rate due to circulatory diseases for Ozyorsk residents was higher than the similar value identified for the total population of the Russian Federation and it had no tendency to decrease during the entire period of the follow-up.

This is just the first stage of the research work related to the analysis of Ozyorsk population mortality. Further analysis of mortality rates will be made using various sources of mortality data. Besides, the authors plan to study mortality in population groups exposed to occupational radiation in detail.

KEYWORDS: MORTALITY STRUCTURE, POPULATION, OZYORSK, CAUSE OF DEATH REGISTER

IRON DEFICIENCY INCIDENCE RATES IN INDIVIDUALS OCCUPATIONALLY EXPOSED TO CHRONIC IONIZING RADIATION

Ye.V. Bragin, M.V. Bannikova, T.V. Azizova

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

A.V. Korobkin

SBHI Chelyabinsk Regional Clinical Hospital, Chelyabinsk, Russia

ANO Chelyabinsk Regional Hematology Society, Chelyabinsk, Russia

Iron deficiency (ID) is the most common disease among blood disorders. However, all the studies investigating ionizing radiation impact on hemopoiesis focus on the leucocyte count while effects on the erythroid component of hemopoiesis has been insufficiently investigated. The study aimed to assess incidence rates of ID and some ID types in individuals chronically exposed to ionizing radiation. The cohort under study was comprised of workers hired by the main Mayak facilities in 1948–1982 and followed up till the end of 2018. The study identified 1,643 cases of ID among the workers of the cohort. Statistical analysis was performed using standard methods of medical statistics. Crude, age-specific and standardized rates were estimated for incidence of all ID types, ID with a somatic pathology and ID of undefined origin. Incidence rates were calculated per 100,000 person-years of the follow-up for men and women separately and for the entire cohort. Age standardization was performed indirectly using an internal standard for age distribution. Two-sided Student's t-test was used to assess the significance of differences in incidence rates. ID incidence rates were significantly increased in females compared to males. ID incidence rates increased by the end of the follow-up period and were significantly higher in workers externally exposed to gamma doses of 0.01–0.05 Gy compared to workers exposed to doses below 0.01 Gy. The study found no dependence of ID incidence rates on cumulative bone-marrow absorbed doses of internal alpha exposure. Therefore, ID incidence rates depended on both non-radiation and radiation factors.

KEYWORDS: INCIDENCE RATES, IRON DEFICIENCY, CHRONIC RADIATION EXPOSURE, EXTERNAL RADIATION EXPOSURE, INTERNAL RADIATION 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
Трапезников Александр Викторович — 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

Сведения об авторах статей:

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Азизова Тамара Васильевна | – к.мед.н., главный научный сотрудник, заместитель директора по науке, заведующий клиническим отделом, т. (35130) 29395, <i>clinic@subi.su</i> |
| Алдибекова Альбина Есжановна | – старший инженер экспериментального отдела, т. (351) 2327924, <i>albinaes@gmail.com</i> |
| Андреев Сергей Сергеевич | – к.б.н., ведущий инженер экспериментального отдела, т. (351) 2327924, <i>andreevsss@mail.ru</i> |
| Атаманюк Наталья Игоревна | – к.б.н., старший научный сотрудник экспериментального отдела УНПЦ РМ, доцент кафедры радиационной биологии ЧелГУ, т. (351) 2327924, <i>vita_pulhra@mail.ru</i> |
| Банникова Мария Владимировна | – научный сотрудник, т. (35130) 29320, <i>clinic@subi.su</i> |
| Брагин Евгений Викторович | – научный сотрудник, т. (35130) 29320, <i>clinic@subi.su</i> |
| Городецкий Владислав Геннадьевич | – к.ф.-м.н., старший инженер лаборатории общей радиоэкологии, <i>vgorodetsky@mail.ru</i> |
| Григорьева Евгения Сергеевна | – научный сотрудник, т. (35130) 29373, <i>clinic@subi.su</i> |
| Коржавин Александр Васильевич | – к.вет.н, старший научный сотрудник лаборатории общей радиоэкологии, <i>BFS_zar@mail.ru</i> |
| Коробкин Александр Владимирович | – к.мед.н., врач-гематолог, главный внештатный гематолог Министерства здравоохранения Челябинской области, <i>clinic@subi.su</i> |
| Кузнецова Наталья Анатольевна | – начальник группы исследовательской лаборатории ЦЗЛ, т. (35130) 37182, <i>cpl@po-mayak.ru</i> |
| Мелихова Елена Михайловна | – к.ф.-м.н., заведующий лабораторией проблем коммуникации при оценке риска, т. (916) 2730957, <i>e_mel@ibrae.ac.ru</i> |
| Мокров Юрий Геннадьевич | – д.т.н., советник генерального директора по науке и экологии, т. (35130) 33304, <i>mokrov@po-mayak.ru</i> |
| Обвинцева Надежда Александровна | – научный сотрудник экспериментального отдела, т. (351) 2327924, <i>n_obvintseva@mail.ru</i> |
| Окатенко Павел Викторович | – руководитель группы компьютерного и программного обеспечения лаборатория радиационной эпидемиологии, т. (35130) 76903, <i>okatenko@subi.su</i> |

Орлова Ирина Александровна	— инженер-технолог исследовательской лаборатории ЦЗЛ, т. (35130) 37527, <i>cpl@po-mayak.ru</i>
Перетыкин Андрей Анатольевич	— младший научный сотрудник экспериментального отдела, т. (351) 2327924, <i>engineer_eo@mail.ru</i>
Пряхин Евгений Александрович	— д.б.н., профессор, зав. экспериментальным отделом, т. (351) 2327925, <i>pryakhin@urcrm.ru</i>
Рыбкина Валентина Львовна	— д.мед.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией № 9, т. (35130) 29330, <i>clinic@subi.su</i>
Сахненко Ольга Анатольевна	— инженер-технолог исследовательской лаборатории ЦЗЛ, т. (35130) 37193, <i>cpl@po-mayak.ru</i>
Стяжкина Елена Владимировна	— к.б.н., старший научный сотрудник экспериментального отдела УНПЦ РМ, доцент кафедры радиационной биологии ЧелГУ, т. (351) 2327924, <i>yelena-st@mail.ru</i>
Трапезников Александр Викторович	— д.б.н., заведующий Биофизической станцией и Отделом континентальной радиоэкологии, <i>vera_zar@mail.ru</i>
Трапезникова Вера Николаевна	— к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории общей радиоэкологии
Тряпицына Галина Александровна	— д.б.н., ведущий научный сотрудник экспериментального отдела УНПЦ РМ, профессор кафедры радиационной биологии ЧелГУ, т. (351) 2327925, <i>tga28@mail.ru</i>
Царева Юлия Вячеславовна	— к.мед.н., научный сотрудник лаборатории радиационной эпидемиологии, т. (35130) 75629, <i>tsareva@subi.su</i>

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
Федерального государственного унитарного предприятия
"ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "МАЯК"
ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
№ 1 (109) 2023

Технический редактор И.Н. Моисеева

Переводчик – Е.В. Лупеха

Корректоры: О.А. Константинова, Д.Ю. Сезонова, Н.П. Подольская

ПОДПИСКА – 2023

**С октября 2022 г. на сайте "Почта России" проводится
подписная кампания на январь - июнь 2023 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 31.03.2023

Выход в свет 04.04.2023

Тираж 70 экз.

Цена договорная

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